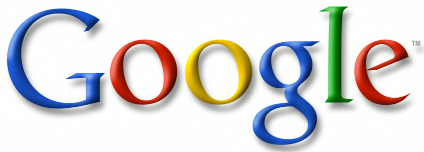
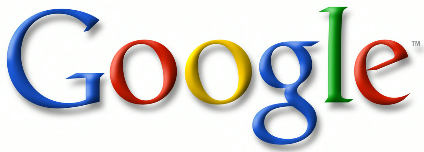






LA

TRACTION ÉLECTRIQUE

LA

TRACTION ÉLECTRIQUE

SUR VOIES FERRÉES

VOIE — MATÉRIEL ROULANT — TRACTION

PAR

ANDRÉ BLONDEL
Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Professeur d'Électricité appliquée
à l'École des Ponts et Chaussées.

F. PAUL-DUBOIS
Ingénieur des Ponts et Chaussées
et du Service municipal
de la Ville de Paris.

Avec 1014 figures dans le texte.

Ouvrage honoré d'une souscription du Ministère des Travaux publics.

TOME SECOND

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÉGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1898

LA

TRACTION ÉLECTRIQUE

CHAPITRE VIII

MATÉRIELS APPLICABLES A DES CAS SPÉCIAUX : SERVICES A GRANDE VITESSE ; MONORAILS ; LIGNES A FORTES RAMPES

Nous examinerons rapidement dans ce chapitre divers matériels spéciaux dont l'étude n'a pu trouver place dans les précédents.

§ 1. — Matériels spéciaux pour grandes vitesses

Généralités. — Comme nous l'avons déjà dit (t. I, p. 497), un cas particulièrement favorable à la traction électrique est celui des services à grande vitesse. De fait, la locomotive électrique tient actuellement la tête au point de vue de la rapidité, car dans les essais de MM. Weems et Crosby, sur lesquels nous reviendrons plus loin, on a atteint une vitesse de plus de 180 km : h. qui bat le maximum de 160 km. environ réalisé par la locomotive à vapeur.

Nous avons indiqué précédemment pour quels motifs l'électricité l'emporte dans ce cas sur la vapeur et on le verra avec plus de détails au chapitre de la *Traction*, par l'étude des conditions de marche correspondantes. On peut admettre ici que, pour des vitesses de 150 km : h., la locomotive et surtout l'automobile électriques sont seules acceptables. L'objet du présent paragraphe est d'indiquer les dispositions spéciales que doit remplir un matériel permettant d'atteindre ces vitesses et de donner quelques exemples de dispositifs expérimentés ou projetés.

Pour pouvoir réaliser une marche très rapide, il faut avant tout

une *voie libre*, une *structure solide* et des *voitures stables* actionnées par des *moteurs puissants*.

On peut dire que l'augmentation de vitesse des trains de chemins de fer a constamment suivi les progrès du matériel. Ainsi c'est en Angleterre, où la voie est le plus robuste, qu'on marche le plus vite en moyenne.

Dans le cours des dernières années, des vitesses de 130, 150 et même exceptionnellement 160 km : h. ont été atteintes sans inconvénient dans différents pays par des trains express, à la descente de pentes et dans des cas spéciaux, sur des voies particulièrement solides.

Mais, pour réaliser en service courant des vitesses notablement supérieures, atteignant par exemple 200 ou 250 km : h.[1], il faudrait renforcer encore les voies actuelles, peut-être même en changer complètement le mode de construction pour le mettre en rapport avec les exigences nouvelles.

Le tracé devrait, bien entendu, éviter les courbes raides et les fortes rampes, bien qu'à ce dernier point de vue on ne soit pas enfermé dans des limites aussi étroites avec la traction électrique qu'avec la traction à vapeur.

Pour réduire le poids mort des trains au strict minimum, tout en réalisant le maximum d'adhérence, on devrait, comme nous l'avons indiqué déjà, faire usage d'automobiles ou de voitures locomotrices montées sur des bogies à 2 ou 3 essieux moteurs; on a vu aussi qu'on pourrait facilement arriver dans ce cas à loger dans le truck une puissance suffisante.

Le montage sur bogies est d'ailleurs indispensable pour assurer la souplesse et la stabilité des véhicules et diminuer la fatigue de la voie aux grandes vitesses. On sait, en effet, que les voitures de chemins de fer ont une allure d'autant plus régulière et plus sûre aux grandes vitesses que l'écartement extrême de leurs essieux est plus grand ; les bogies permettent d'accroître considérablement cet écartement, tout en procurant la flexibilité nécessaire pour le

[1] Il est difficile, même au point de vue théorique, de dépasser la vitesse de 250 km : h. avec le système actuel de véhicules sur roues : la vitesse est, en effet, limitée par la résistance du métal des roues, qui tend à éclater sous l'action de la force centrifuge; pour des roues en acier de 2,50 m. de diamètre, la limite de sécurité est à peu près atteinte à la vitesse de 250 km. à l'heure.

passage dans les courbes. Un autre élément de stabilité est le poids : une voiture lourde présente une inertie considérable, qui ne saurait être surmontée facilement par les chocs dus aux dénivellations de la voie. Lorsque ces chocs se reproduisent périodiquement, comme c'est le cas pour ceux occasionnés par les joints des rails, il est essentiel que la durée d'oscillation propre du véhicule, considéré comme un système oscillant sous l'action des ressorts de suspension, soit très longue par rapport à l'intervalle de ces chocs, pour qu'il ne puisse y avoir synchronisation et par suite renforcement des oscillations. A ce point de vue encore, les grandes voitures à bogies, qui ont un poids total très élevé et une période d'oscillation très lente, possèdent une sérieuse supériorité sur les véhicules plus courts et plus légers.

Les moteurs seront accouplés directement aux essieux. Ces moteurs étant très gros, on devra adopter de grands diamètres pour les roues motrices ; c'est d'ailleurs une condition favorable à la réalisation de grandes vitesses, mais qui conduira, si l'on ne veut pas trop élever le centre de gravité de la voiture [1], à placer le compartiment à voyageurs entre les deux bogies, en abaissant le plancher le plus possible.

Pour diminuer la résistance atmosphérique, il sera utile de munir l'avant du véhicule moteur d'une proue coupante, de supprimer toutes les saillies latérales, et, si le train est composé de plusieurs voitures, de les relier entre elles par des soufflets, de manière à constituer une sorte de bloc parallélipipédique offrant le moins de prise possible à l'air.

Exemples. — Les premiers essais, à notre connaissance, de traction électrique à très grande vitesse ont été exécutés en 1889 par MM. *D. G. Weems* et *O. T. Crosby*, à Laurel (Maryland), pour l'Electro-Automatic Transit Co., de

[1] On tend actuellement, surtout en Amérique, ainsi que nous l'avons déjà signalé plus haut, à élever le centre de gravité des locomotives à grande vitesse : il a été reconnu que cette élévation diminue la fatigue de la voie, en réduisant les chocs latéraux et la poussée sur le rail extérieur dans les courbes; les oscillations d'une machine dont le centre de gravité est élevé sont aussi plus longues que celles d'une machine basse, ce qui rend sa marche plus aisée. Mais on ne doit pas perdre de vue qu'au passage des courbes à grande vitesse la tendance au renversement est plus grande lorsque le centre de gravité est élevé ; il y a, de plus, dans ce cas, danger de déraillement vers l'intérieur, par suite de la diminution de charge sur le rail intérieur. Ces dernières considérations nous paraissent prépondérantes lorsqu'il s'agit de véhicules destinés à circuler à très grande vitesse.

Baltimore. Encore ces essais furent-ils faits sur une très petite échelle, car le but poursuivi était simplement l'organisation d'un service automatique de transport de petits colis entre localités rapprochées; le véhicule employé dans les expériences ne pouvait contenir même une seule personne[1].

Ce véhicule (fig. 453) consistait en une caisse étroite de 0,76 m. de hauteur, 0,62 m. de largeur et 3,96 m. de longueur, terminée par deux têtes pyramidales et montée sur deux essieux. Chacun de ces essieux était attaqué par un moteur Sprague à commande directe, construit pour développer 20 chev. à la vitesse normale de 3 000 tours par minute, correspondant à 400 km : h.

L'ensemble, qui pesait 2,5 t. environ, roulait sur une voie de 0,70 m. d'écartement, formant une boucle fermée de 3 km. de longueur et constituée par des

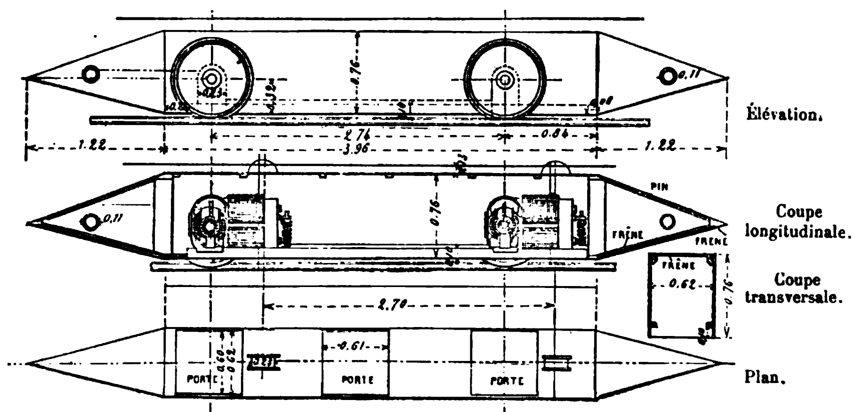


Fig. 453. — Essais Weems-Crosby. — Détails du véhicule.

rails Vignole de 8 kg. posés sur traverses; une charpente continue en bois, élevée sur ces traverses, soutenait au-dessus de l'axe de la voie un rail renversé servant de conducteur (fig. 454). La prise de courant s'effectuait au moyen de balais en cuivre appuyés contre ce rail par des ressorts; le retour avait lieu par la voie. La tension employée était de 500 volts et le réglage de la vitesse s'opérait par des modifications de voltage à l'usine génératrice, placée à l'intérieur de la boucle.

La structure de la voie était malheureusement trop légère et il s'en est fallu de beaucoup qu'on atteignît le nombre de tours indiqué ci-dessus : la plus grande vitesse réalisée a été d'environ 184 km : h.

Les expériences, interrompues prématurément par les déraillements continuels de la voiture et par la désorganisation de la voie, ont néanmoins fourni des données intéressantes, et que nous résumons au chapitre XIII, concernant la résistance atmosphérique aux grandes vitesses.

Les autres essais de traction électrique à grande vitesse sont restés jusqu'ici à l'état de projet, à l'exception d'une très intéressante expérience en cours à l'Exposition de Bruxelles (Express-Eclair Monorail *Behr*), dont nous parlerons au paragraphe suivant. La ligne en construction entre Baltimore et Washing-

[1] *Cf.* « Report on High Speed Electric Railway Work », par M. O. T. Crosby (*Amer Inst. of El. Eng.*, 1891).

ton (Columbia and Maryland R. R.), présentant une longueur de 60 km. qui devra être franchie, d'après l'horaire, en moins de 45 minutes, ce qui nécessitera en certains points du parcours une vitesse de 100 km : h., ne peut être rangée proprement dans la catégorie des chemins de fer à très grande vitesse ; l'exploitation de cette ligne sera néanmoins suivie avec le plus grand intérêt, car elle permettra de résoudre expérimentalement bien des questions qui se posent dans ce genre de service.

Nous ne mentionnerons qu'en passant un projet déjà ancien du Dr *Wellington Adams* pour la construction d'un chemin de fer électrique à grande vitesse entre Chicago et Saint-Louis. Le tracé serait absolument en ligne droite. La vitesse de marche atteindrait 180 km. à l'heure. La figure 455 montre la disposition proposée pour les voitures; elles seraient portées par deux bogies à deux paires de roues inégales (0,80 m. et 1,80 m. de diamètre respectivement) ; la charge reposerait presque en totalité sur les grandes roues, dont l'essieu serait attaqué directement par un moteur à courants alternatifs de 200 chev.; le plafond de la caisse ne s'élèverait qu'à 2,70 m. au-dessus du niveau des rails, et le centre de gravité serait au-dessous des essieux moteurs. L'avant serait muni d'une proue coupante, en arrière de laquelle se trouverait la cabine du mécanicien; le compartiment à voyageurs serait placé entre

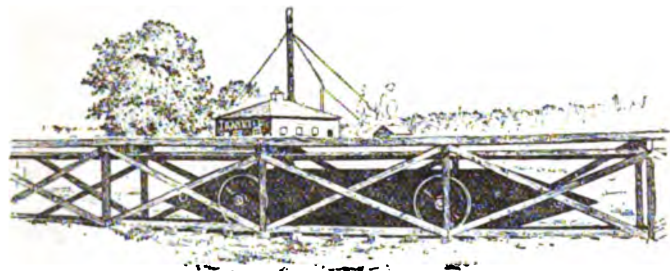


Fig. 454. — Essais Weems-Crosby. — Vue d'ensemble de la voie et du véhicule.



Fig. 455. — Projet de chemin de fer à grande vitesse entre Chicago et Saint-Louis
Elévation de la voiture automobile.

les deux essieux moteurs. L'automobile complètement équipée ne pèserait que 10 t. Le système de distribution serait le système polyphasé ; la ligne, dont la longueur totale serait de 400 km., comprendrait 25 sections secondaires alimentées chacune en son milieu par un transformateur abaissant à 3 000 volts le courant transmis par une ligne primaire à la tension de 25 000 volts. Cette étude paraît malheureusement encore peu sérieuse.

Un projet mieux étudié est celui d'un chemin de fer électrique à grande vitesse de 240 km. de longueur entre Vienne et Budapest, qui a été présenté par M. *Carl Zipernowski,* directeur de la maison Ganz et C[ie], au Congrès de Francfort en 1891 [1].

Ce projet repose sur l'hypothèse d'un service analogue à un service de tramway, réalisé par des voitures automobiles isolées se succédant à des intervalles de 10 à 60 minutes, suivant les heures de la journée. La vitesse maxima prévue est de 250 km. à l'heure. La ligne serait alimentée par deux usines génératrices situées à 60 km. environ de chacune des extrémités ; un courant alternatif primaire à 10 000 volts, produit dans ces stations, serait transmis par des conducteurs aériens à des sous-stations de transformation, d'où des courants secondaires à 1 000 volts environ seraient amenés aux voitures par deux rails conducteurs placés à l'intérieur de la voie.

La voiture qui a été construite comme modèle dans les ateliers de la maison Ganz est un véhicule à bogies contenant 40 places, 2 cabinets de toilette et des compartiments pour la poste et pour les appareils de régulation (fig. 456). Elle mesure 45 m. de longueur, 2,15 m. de largeur et 2,20 m. de hauteur, et se termine à ses deux extrémités par des avant-becs à profil parabolique. Les parties situées au-dessus des bogies sont exclusivement consacrées à la machinerie ; elles sont séparées du compartiment des voyageurs, placé entre les deux trucks, par une cloison en tôle avec porte de communication et isolées de même de la cabine du mécanicien, située tout à fait à l'extrémité de la caisse, pour les préserver des courants d'air violents qui se produiront à travers les ouvertures des bogies. La carcasse de la caisse est constituée par un système de poutres longitudinales, à montants espacés de 1,50 m., fortement entretoisées en bas et en haut.

La caisse repose par l'intermédiaire de 16 paires de ressorts spiraux sur deux bogies à deux essieux, de 5 m. d'empattement, écartés de 30 m. d'axe en axe. Les ressorts sont enfermés dans des boîtes télescopiques fixées à la carcasse de la caisse et pouvant glisser sur des portées en arc de cercle ménagées sur le châssis des bogies ; le mouvement de rotation de ceux-ci autour de leur pivot est d'ailleurs très limité : le jeu latéral de l'extrémité du châssis, correspondant à un rayon de courbure minimum de 1 000 m., n'est que de 16 mm.

Chaque essieu, muni de roues pleines à double disque de 2,50 m. de diamètre, est attaqué par un moteur gearlesss de 200 chev., dont les inducteurs sont supportés par le châssis sans intermédiaire élastique.

Le courant est capté sur les rails conducteurs au moyen de deux paires de galets à gorge de grand diamètre, montés sur chacun des bogies. Ces galets sont constitués, comme les roues motrices, par deux disques en tôle d'acier comprenant entre eux un bandage facile à remplacer ; ils sont isolés l'un de l'autre, ainsi que du reste de la voiture, et transmettent le courant aux moteurs par l'intermédiaire de frotteurs de cuivre.

Toute la machinerie peut être inspectée d'une passerelle étroite montée au-dessus des essieux.

Les appareils de sécurité comprendront un frein électrique et un frein Wes-

[1] Voir dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, 2 et 9 octobre 1891, le mémoire original de M. Zipernowski, auquel nous renvoyons pour les détails du projet.

tinghouse, un tampon de choc à air, et un puissant projecteur destiné à éclairer la route jusqu'à 2 km. de distance.

L'ensemble de la voiture pèsera 60 t. environ en charge.

Pour permettre à ces automobiles de réaliser la vitesse de marche annoncée de 250 km : h., M. Zipernowski a prévu pour leur roulement une ligne absolument spéciale, dans le tracé de laquelle il n'a pas hésité à porter la limite

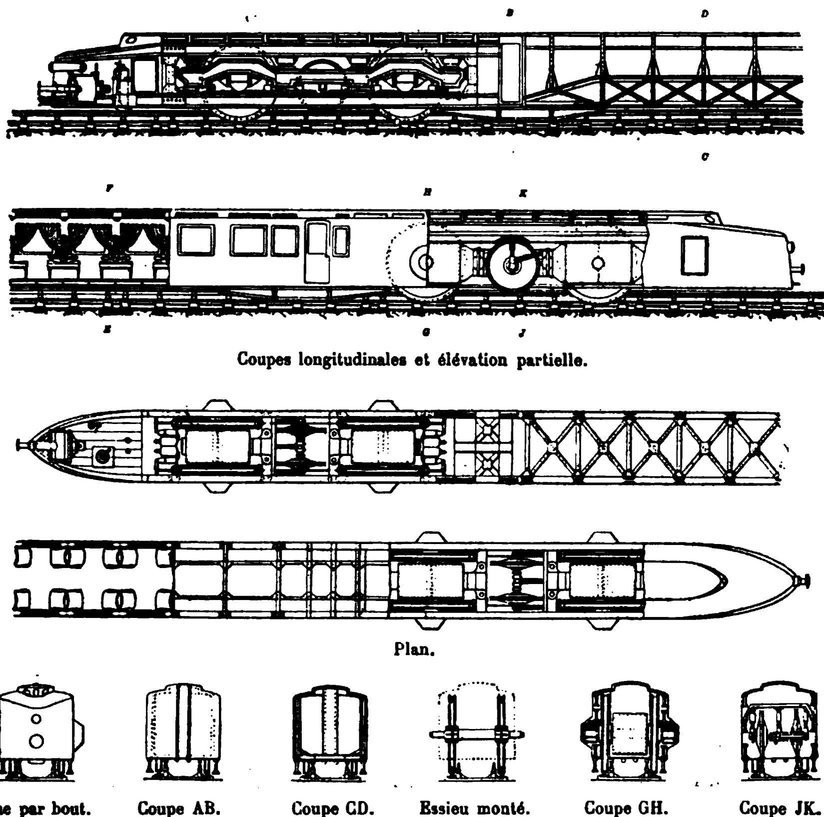


Fig. 456. — Projet de chemin de fer à grande vitesse entre Vienne et Budapest. Voiture automobile.

des déclivités à 10 mm. pour ne pas réduire le rayon des courbes au-dessous de 3 000 m. Cette ligne serait à double voie, sans aiguilles, et les deux voies seraient séparées par un intervalle de 10 m., pour éviter les chocs d'air trop violents au croisement des voitures. Chaque voie serait constituée par des rails Vignole de 180 mm. de hauteur, à patin large, pesant 50 kg. au mètre courant et fixés sur des traverses en acier coulé, ancrées elles-mêmes sur une

fondation continue en béton, sur laquelle les rails reposeraient dans l'intervalle des traverses.

La sécurité de l'exploitation serait assurée par une sorte de block-system automatique ; la ligne serait à cet effet divisée en sections mesurant au plus 2 km. de longueur.

M. Zipernowski évalue les dépenses de construction de cette ligne à 200 ou 250 millions de francs, pour une longueur de 240 km., soit environ un million par kilomètre.

Conditions dans lesquelles pourrait être réalisée pratiquement la traction à grande vitesse. — La réalisation d'un projet tel que celui de M. Zipernowski ne présente rien d'impossible au point de vue purement technique et, dans ses prévisions, l'auteur paraît avoir péché plutôt par excès que par défaut de prudence. La principale, sinon la seule, difficulté pratique réside dans la dépense considérable que nécessiterait l'établissement d'une ligne ainsi conçue.

Cette dépense ne parait malheureusement pas susceptible de bien fortes réductions, comme on peut s'en convaincre en examinant un à un les principaux éléments d'une telle entreprise, même réduite à des proportions plus modestes ; car il ne paraît pas utile de chercher à réaliser dès maintenant des vitesses de 250 km : h., et si l'on arrivait seulement à doubler la vitesse commerciale de nos grands express, qui ne dépasse guère 80 km : h., on obtiendrait déjà une amélioration considérable du service actuel.

Proposons-nous donc comme but la réalisation d'une vitesse commerciale de 150 à 160 km : h. Une vitesse maxima de 200 km : h. suffira probablement, car l'électricité permet de rapprocher la vitesse commerciale de la vitesse limite, en diminuant les ralentissements sur les rampes et en accélérant les démarrages.

Avec l'encombrement actuel des lignes à grand trafic, qui seules peuvent motiver l'emploi des grandes vitesses, on ne peut, sous peine de bouleverser tous les horaires et de rendre l'exploitation normale impossible, songer à lancer des trains à la vitesse de 200 km : h. sur les voies suivies par les convois ordinaires. Il serait donc indispensable de doubler les lignes existantes, comme on l'a déjà fait pour les « trunk lines » américaines, qui sont à 4 voies spécialisées respectivement pour les trains de marchandises et omnibus et pour les express. Mais en Europe, où les compagnies de chemins de fer ne possèdent en général que le terrain strictement nécessaire à l'assiette de leurs voies, ce doublement ne pourrait s'effectuer qu'en créant des lignes entièrement neuves, avec une plate-forme spéciale.

Dans le tracé de ces lignes, on serait un peu moins limité pour les déclivités qu'on ne l'a été pour les grandes artères de nos réseaux, car une augmentation des rampes n'exige pas avec la traction électrique par automobiles, comme avec la traction à vapeur, une augmentation du nombre des essieux couplés : c'est uniquement une question de puissance des moteurs.

Pour pouvoir réaliser de grandes vitesses, ce sont surtout les courbes qu'il faudrait adoucir le plus possible. Néanmoins, il ne paraît pas nécessaire de fixer, comme l'a fait M. Zipernowski, le rayon minimum à 3 000 m. Dans une courbe de 900 m. sans dévers, il n'y aurait théoriquement de danger de renversement par la force centrifuge, pour les véhicules à centre de gravité très bas que

nous considérons, qu'à des vitesses supérieures à 250 km : h. [1]. Le surhaussement du rail extérieur vient encore augmenter la limite de sécurité. En renforçant convenablement la voie en ces points et tenant compte de ce que les automobiles à bogies seront plus douces pour la voie, surtout à l'entrée et à la sortie des courbes, que les locomotives ordinaires, il semble bien qu'on pourrait abaisser sans danger le rayon à 1000 m. et même 900 m., c'est-à-dire se rapprocher sensiblement des conditions d'établissement des grandes lignes françaises.

La double voie serait indispensable, par suite de l'impossibilité de réaliser de grandes vitesses avec la voie unique. Mais on reconnaitrait sans doute la possibilité de donner à l'entre-voie une largeur moindre que 10 m.; il est probable qu'il suffirait d'augmenter de 3 ou 4 m. au plus l'entre-voie actuelle, en la portant à 5 ou 6 m.

En ce qui concerne la structure même de la voie, il n'est pas douteux qu'il ne faille augmenter dans de fortes proportions la résistance des voies existantes. Mais il est bien difficile de déterminer exactement dans quelle mesure, ni même quel serait l'accroissement de fatigue résultant d'une pareille augmentation de vitesse, car parmi les facteurs les plus importants de cette fatigue figurent les actions dynamiques dues aux chocs anormaux, actions qu'on sait croître rapidement avec la vitesse, mais sur la valeur absolue desquelles on ne peut faire jusqu'ici que des hypothèses.

D'après les opinions les plus autorisées, telles que celle de M. P. H. Dudley [2], l'ingénieur américain bien connu, une voie en rails de 50 kg. bien rigides, fixés sur des traverses rapprochées et assises sur du bon ballast, suffirait, dans les conditions d'exploitation actuelles, pour rendre la circulation absolument sûre jusqu'à 160 km : h. environ. Mais pour des vitesses très supérieures, allant jusqu'à 200 km : h., ni la théorie ni l'expérience ne donnent d'indication précise et l'on ne peut plus faire que des déductions plus ou moins hasardées.

Il est vrai qu'à égalité de masse et de vitesse les automobiles électriques fatigueront moins la voie que les locomotives à vapeur, pour les motifs indiqués plus haut (t. I, p. 482) : absence à peu près complète de mouvements de lacet et de galop, suppression du pilonnement dû à l'oscillation verticale des bielles et à la présence des contrepoids, enfin diminution des porte à faux et égalisation de la charge sur les essieux résultant du montage sur bogies. En supposant même que l'exploitation, au lieu de se faire par voitures isolées, comporte des trains de 2 ou 3 voitures, ces trains électriques de 120 ou 140 t. au maximum seront incontestablement plus doux pour la voie ferrée que les express actuels de 300 t., et une voie présentant la même solidité que les meilleures voies

[1] En effet, en supposant que le véhicule ait son centre de gravité à 1,25 m. au-dessus du niveau des rails, la condition de stabilité, sur une voie normale sans dévers, est

$$\frac{1}{g}\frac{V^2}{R} \leq \frac{1,44}{2}\frac{1}{1,25}$$

A la vitesse de 250 km : h. ou environ 70 m. par seconde, on a donc

$$\frac{4\,900}{9,81\ R} \leq 0,58$$

ce qui donne pour limite $R = 875$ m.

[2] *Proceedings Amer. Inst. of El. Eng.*, 24 février 1891.

existantes permettrait sans doute de réaliser avec l'électricité un certain accroissement de vitesse par rapport aux limites qu'il y aurait aujourd'hui danger à dépasser avec la traction à vapeur.

Mais, en dépit de ces conditions favorables, pour faire circuler des trains avec sécurité à la vitesse de 200 km : h., il est certain qu'il sera nécessaire de renforcer notablement les voies actuelles : on devra employer des rails encore plus lourds, rapprocher les traverses autant qu'on pourra le faire sans nuire au bourrage, augmenter l'épaisseur du ballast, qui devra être d'excellente qualité et que l'on sera, par suite, généralement obligé de faire venir de loin; dans les courbes, des moyens spéciaux de consolidation devront être appliqués pour mettre la voie en état de résister à la poussée latérale des roues. L'emploi des joints soudés serait ici particulièrement rationnel pour supprimer les chocs au passage des joints.

Ces précautions ne seront même peut-être pas *suffisantes :* ce n'est pas assez d'avoir une voie d'une grande résistance et d'une grande raideur; il faut encore qu'elle soit assise sur une fondation bien stable; or presque tous les remblais, et même le sol de certaines tranchées, sont sujets à tasser; pour se mettre à l'abri d'une pareille éventualité et des déformations de la superstructure qui en seraient la conséquence, on pourra se trouver conduit à asseoir la voie en ces points sur des sortes de ponts ou de viaducs continus.

De toutes façons, la voie coûtera beaucoup plus cher que les meilleures voies existantes.

En ce qui concerne le matériel roulant, on pourra probablement le faire plus léger que celui prévu par M. Zipernowski. D'ailleurs, en pratique, nous croyons qu'il conviendra de s'écarter le moins possible des formes usuelles, car peu de personnes se soucieraient de s'enfermer dans des espèces de projectiles en tôle comme ceux qui ont généralement été proposés par les promoteurs de chemins de fer à grande vitesse.

La transmission de courant aux véhicules pourra se faire comme l'indique M. Zipernowski ou par d'autres procédés; c'est une question que nous étudierons en parlant de la distribution et qui ne présente pas de difficultés sérieuses.

Pour la sécurité de l'exploitation, l'essentiel sera d'avoir une voie très libre, très bien surveillée, avec un block-system automatique tel que permet de le réaliser une exploitation entièrement électrique, et de supprimer entièrement les passages à niveau, bifurcations et autres points spéciaux de la voie où des ralentissements sont nécessaires, ne fût-ce que pour la sécurité de la circulation sur les voies rencontrées.

Le freinage à ces grandes vitesses est une question très sérieuse, mais qu'il n'est pas impossible de résoudre d'une façon satisfaisante. La force vive d'un train de 120 t. lancé à 200 km : h. n'est pas bien supérieure à celle d'un train de 300 t. marchant à 125 km : h.; il est vrai que le nombre des roues sur lesquelles agiraient les sabots de freins serait notablement moindre dans un train électrique composé de 2 ou 3 voitures que dans un train ordinaire; mais à l'effet du frein mécanique viendrait s'ajouter, dans le premier cas, le freinage électrique très énergique obtenu à l'aide des moteurs suivant les procédés étudiés au chapitre XIV. On peut compter que, dans les circonstances ordinaires, on pourrait arrêter le train sur un espace de 2000 m. environ. Ce chiffre fait bien ressortir la nécessité absolue d'avoir une voie parfaitement libre.

Avenir de la traction électrique à grande vitesse. — Au total, une pareille entreprise n'offre aucune difficulté supérieure à celles que les moyens actuels de l'industrie permettent de vaincre, et le seul obstacle véritable est l'importance de la dépense qu'entraînerait sa réalisation.

Si l'on tient compte, en effet, de la nécessité de construire une ligne entièrement neuve, à double voie, et du supplément de dépenses qu'occasionneraient, relativement au coût des grandes lignes du type ordinaire, l'augmentation du rayon des courbes, la largeur plus grande donnée à la plate-forme, le renforcement général de la structure, l'abolition des passages à niveau, etc., il paraît difficile, même en supposant les installations accessoires, telles que les gares, réduites au minimum, d'évaluer à moins de 5 ou 600 000 fr. par kilomètre, dans les conditions topographiques les plus favorables, le coût de construction d'une pareille ligne; le ballast à lui seul reviendrait à plus de 50 000 fr. par kilomètre. En regard de ces chiffres, la dépense de l'équipement électrique serait peu de chose : probablement pas plus de 35 à 40 000 fr. par kilomètre.

D'autre part, une ligne à grande vitesse devra forcément être longue : ce ne serait guère la peine d'engager d'aussi grosses dépenses pour gagner un quart d'heure ou une demi-heure sur la durée d'un trajet; ce n'est qu'à partir de 2 ou 300 km. de distance qu'il y aurait un gain de temps vraiment sérieux. Il en résulte que le capital d'établissement s'élèvera à des chiffres énormes.

Or, pour rémunérer ce capital et faire face aux dépenses d'exploitation, on ne peut compter que sur le trafic voyageurs et peut-être sur un petit supplément de recettes provenant du transport des messageries.

Il se présentera sans doute, tôt ou tard, des cas où le développement des communications entre deux grands centres pourra justifier, au point de vue financier, l'établissement d'une telle ligne. Mais en France tout au moins cette éventualité ne paraît pas encore près de se réaliser[1].

[1] Il est à remarquer, du reste, que, dans notre pays, l'État, lié aux compagnies de chemins de fer par la garantie d'intérêt, ne pourrait autoriser l'établissement d'une ligne à grande vitesse faisant concurrence aux lignes existantes, car elle aurait bientôt

§ 2. — Matériels monorails

Généralités. — Comme on vient de le voir, l'élément prépondérant du prix de revient d'une ligne à grande vitesse, c'est la dépense de construction de la plate-forme.

Dans le but de réduire cette dépense, certains ingénieurs ont proposé l'emploi du système monorail.

Ce système, qui amène le centre de gravité de la charge roulante dans le plan vertical du rail porteur, permet d'alléger sensiblement le matériel roulant, et par suite la voie et l'infrastructure; avec le rail surélevé, il donne la possibilité de corriger jusqu'à un certain point, par la différence de hauteur des supports, les inégalités du profil du sol et de diminuer d'autant la dépense des terrassements. Enfin, le système monorail présente l'avantage additionnel que les véhicules ne peuvent dérailler, quel que soit le rayon des courbes, parce que la forme même de la voie et du matériel roulant rend leur échappement impossible.

Deux types de monorails peuvent être employés : le type *à cacolet* (Lartigue, Behr, Meigs, Beecher, etc.) et le type *bicycle* (Danchell, Boynton, etc.).

Système à cacolet. — Dans le premier, dont le principal promoteur est, comme on le sait, M. *Lartigue,* la voie se compose d'un rail unique surélevé, porté par une série de chevalets ou de poteaux avec guidages latéraux. Les véhicules sont formés de deux parties symétriques, assemblées comme des cacolets, ayant leur centre de gravité au-dessous du rail unique et roulant sur ce rail au moyen de galets verticaux à gorge, tandis que des galets horizontaux, correspondant aux guidages, maintiennent l'équilibre. Les rails-guides n'ont qu'une pression très faible à supporter quand le véhicule est en marche, sauf au passage des courbes ; encore, pour ces dernières, s'efforce-t-on de détruire en majeure partie l'effet de la force centrifuge par un dévers convenable de l'ensemble.

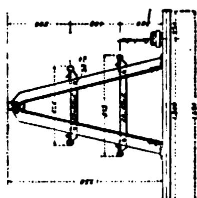
Des dispositions ingénieuses, que nous ne pouvons décrire ici[1], ont été ima-

absorbé tout leur trafic voyageurs direct. On ne peut donc espérer voir l'installation d'une pareille ligne réalisée autrement que par les compagnies elles-mêmes, lorsque leurs voies actuelles ne suffiront plus au trafic.

[1] Pour ces détails, voir notamment un mémoire très intéressant de M. Nicou dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, août 1884, sur le chemin de fer monorail de Listowel à Ballybunion, en Irlande.

ginées pour les changements de voie (plaques tournantes avec portions de voies en courbe) et pour le passage des voies de terre (portions de voies mobiles, ponts-levis).

La première application de la traction électrique au monorail Lartigue date du commencement de l'année 1884, où un petit locomoteur improvisé au moyen d'une dynamo Siemens type D6, placée dans l'une des branches du cacolet et commandant la roue motrice à l'aide d'une transmission par cordes sans fin, a fonctionné au Concours agricole de Paris[1]; ce véhicule, du poids de 260 kg., remorquait à vitesse très réduite (15 km : h. au maximum) de petits trains ne pesant pas 1 t. Une installation du même genre a fonctionné la même année à l'Exposition industrielle de Rouen[2].



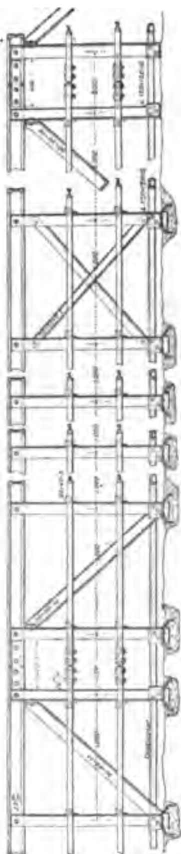


Fig. 457. — Élévation et coupe transversale de la voie monorail Behr.

Depuis lors, le matériel monorail électrique a été perfectionné, mais sans qu'il en ait été fait, à notre connaissance, aucune application bien sérieuse jusqu'à ces derniers temps.

Nous citerons seulement une petite ligne expérimentale qui a été mise en service en Amérique près de Waterport (New-York) et où l'on emploie des accumulateurs comme source d'énergie, ce qui paraît assez peu rationnel, et une autre ligne monorail exploitée électriquement dans une mine espagnole des Pyrénées.

La presse technique a décrit, à différentes reprises, des projets de matériels monorails spéciaux pour la traction électrique dus à MM. Lartigue, Behr, etc. : un des mieux étudiés[3] comportait un véhicule reposant sur deux bogies à 2 roues motrices, dont chacune portait une armature à disque tournant entre deux systèmes inducteurs fixés aux boites à huile et munic d'un commutateur radial. L'emploi des moteurs « gearless » est évidemment tentant avec le système monorail, mais les critiques que nous avons formulées plus haut contre ce type de moteur conservent ici toute leur valeur.

L'application la plus importante de beaucoup de l'électricité au système monorail est celle qui vient d'être réalisée au parc de Tervueren, annexe de l'Exposition internationale de Bruxelles, par M. *F. B. Behr*. Cet ingénieur a fait construire une voie d'expériences formant une courbe fermée de 4 871 m. de longueur, avec rayon minimum de 500 m., et présentant sur la moitié de son développement une rampe continue de près de 11 mm. La figure 457 montre l'élévation et la

[1] *Annales industrielles*, mars 1884. — *Lumière électrique*, t. XIII, p. 499.

[2] Voir les *Comptes rendus de la Société des Ingénieurs civils*, 1884.

[3] Cf. *Éclairage électrique*, 16 juin 1894.

coupe transversale de cette voie ; elle est constituée par un rail porteur à double champignon (fig. 458), soutenu de mètre en mètre par des chevalets métalliques posés sur traverse et sur lesquels sont fixées deux paires de rails guides latéraux; ces chevalets sont contreventés longitudinalement par des écharpes et des croix de Saint-André.

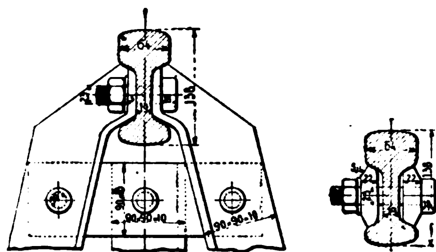


Fig. 458. — Voie monorail Behr. — Détails de l'attache et de l'éclissage du rail porteur.

La voiture, dont les figures 459 à 461 indiquent les dispositions d'ensemble, a 17,68 m. de longueur, 3,33 m. de largeur et peut contenir 100 personnes.

Elle est caractérisée par deux bogies moteurs à quatre roues, à cheval sur le rail de roulement et dont le centre de gravité est situé assez bas pour que le plancher de la caisse qu'ils supportent soit établi tout entier au-dessus de ce rail. Ces bogies sont réunis entre eux par un joint universel d'une construction spéciale et peuvent pivoter sous la caisse, à laquelle ils sont reliés par des chevilles ouvrières.

Chaque bogie est constitué par deux caissons en tôle, qui descendent de chaque côté jusqu'à 0,18 m. du niveau supérieur des traverses et sont reliés



Fig. 459. — Vue d'ensemble de la voiture Behr.

transversalement, par-dessus le rail porteur, par une maîtresse poutre formée de deux fers en C et par d'autres traverses rivées sur les longerons intérieurs des caissons et raccordées par des goussets à leurs longerons extérieurs. Sur les longerons intérieurs sont assemblées les plaques de garde, dans lesquelles

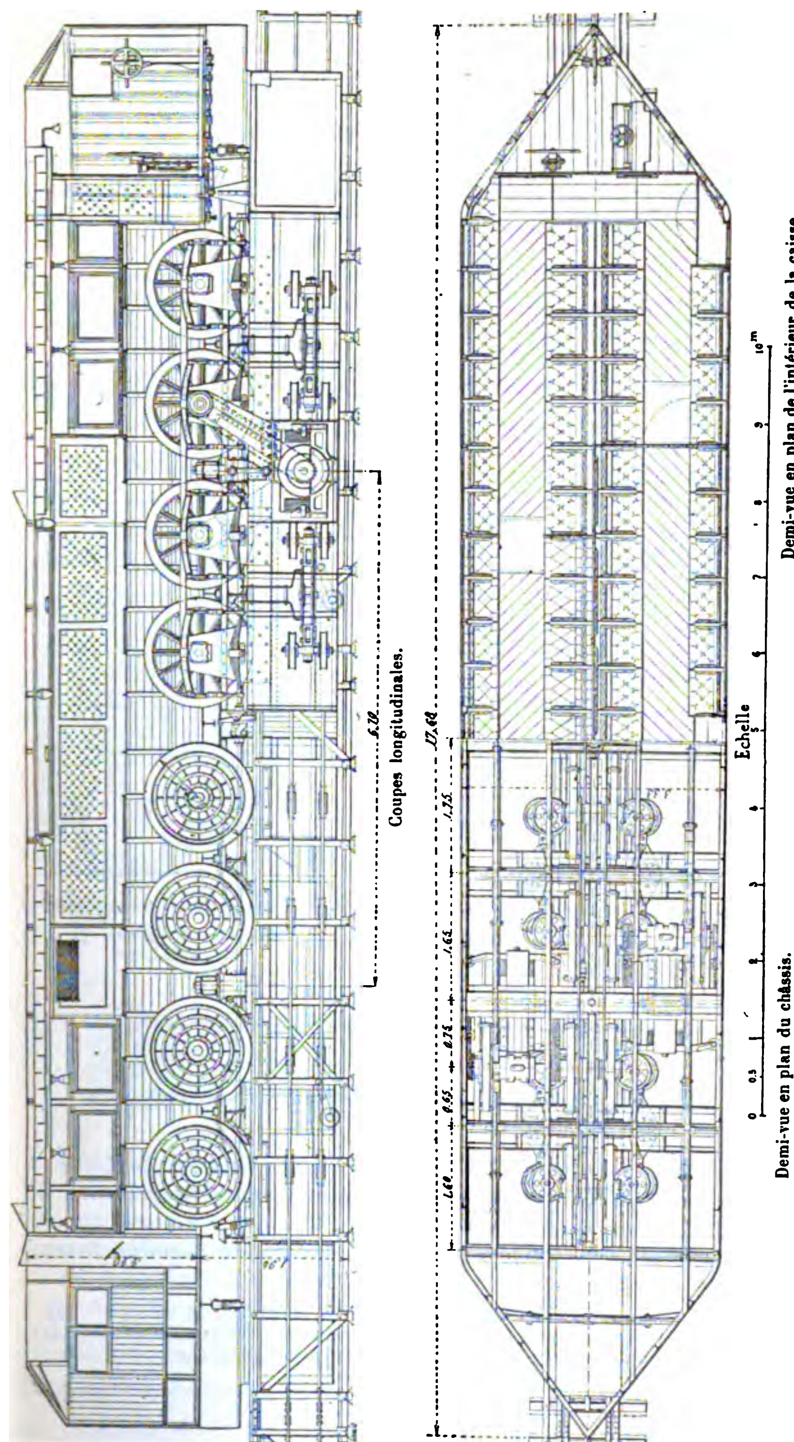
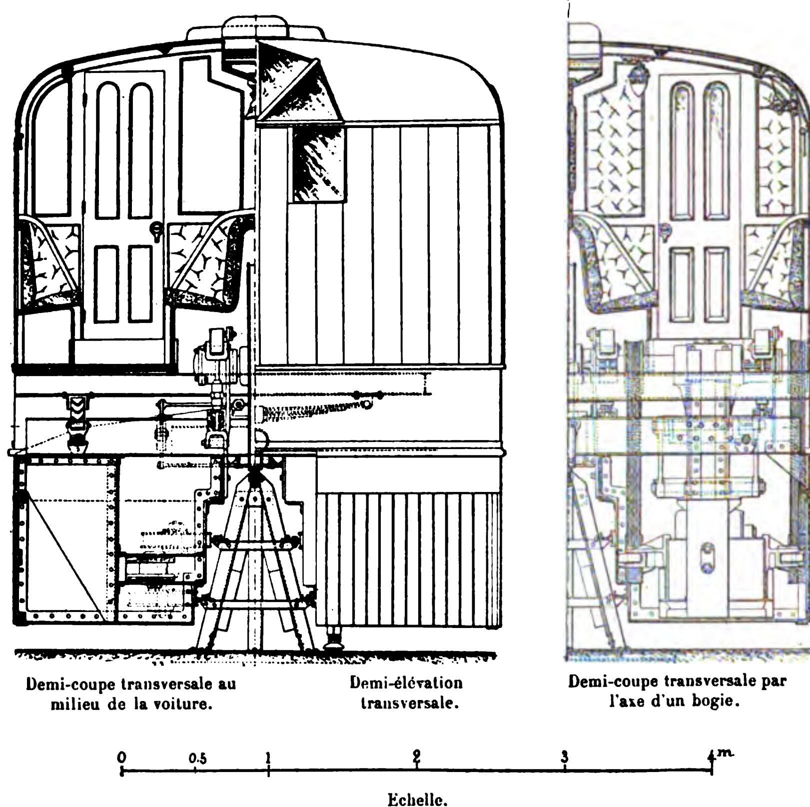


Fig. 460. — Voiture Behr. — Plan et coupes longitudinales.

jouent les boîtes à huile des essieux. La suspension du bogie s'opère par l'intermédiaire de balanciers reposant sur ces boîtes et aux extrémités desquels sont suspendus par des tirants des ressorts dont les chapes sont boulonnées sur les plaques de garde.

Les moteurs, au nombre de quatre, sont logés à la partie inférieure des caissons. Ce sont des moteurs à 4 pôles, dont 2 conséquents, avec induit denté et bobinage Eickemeyer, capables de développer chacun une puissance de 150 chev. à la vitesse de 600 tours : m. (correspondant à 155 km : h.) sous



Demi-coupe transversale au milieu de la voiture. — Demi-élévation transversale. — Demi-coupe transversale par l'axe d'un bogie.

Fig. 461. — Voiture Behr. — Elévation et coupes transversales.

une tension de 700 volts [1]. Ils sont suspendus deux à deux par des bielles à la traverse maîtresse des bogies et actionnent chacun sans réduction de vitesse un des essieux, prolongé à cet effet (fig. 462), par l'intermédiaire de deux chaînes en acier du système Renold; ces chaînes sont formées, comme

[1] L'induit a 661 mm. de diamètre et 279 mm. de longueur; le collecteur est à 184 touches. Chaque moteur pèse environ 3 700 kg., dont 1 650 pour les inducteurs, 825 pour l'induit et 1 225 pour le bâti, les paliers, les porte-balais, etc.

le montre la figure 463, d'une série de maillons plats en acier matricé; les pignons dentés autour desquels elles s'enroulent ont 0,32 m. de diamètre [1]. Une poutre spéciale en tôle sert à maintenir invariable la distance entre l'essieu et l'arbre du moteur.

Chaque bogie porte en outre 8 paires de galets-guides horizontaux, dont la principale fonction est de transmettre aux guidages la pression produite par la force centrifuge dans les courbes; ces galets sont portés par des supports articulés, aux extrémités desquels chaque paire de galets est elle-même montée sur un axe horizontal, de manière à presser toujours également sur les guidages (fig. 464). Tous les paliers, aussi bien ceux des roues motrices que ceux des roues-guides, sont à rouleaux ou à billes.

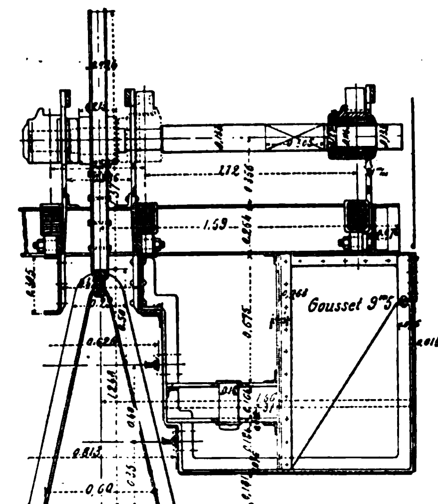


Fig. 462. — Voiture Behr. — Coupe au droit d'un essieu moteur.

La caisse, dont l'ossature est tout entière en acier, repose par huit ressorts longitudinaux et deux ressorts transversaux extrêmes sur les bogies, dont le mouvement d'orientation est facilité par des galets. Aux extrémités, coupées en forme de coin, se trouvent les cabines du mécanicien et du conducteur.

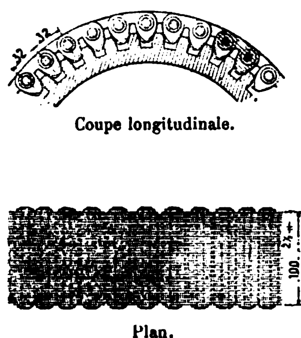


Fig. 463. — Voiture Behr. — Détails de la chaîne de transmission.

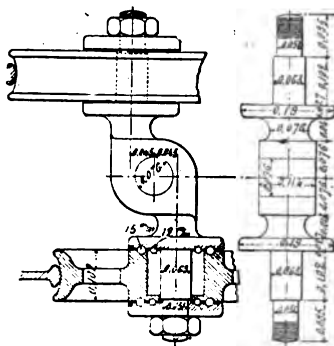


Fig. 464. — Voiture Behr. — Vues de face et de côté de l'arbre des roues-guides.

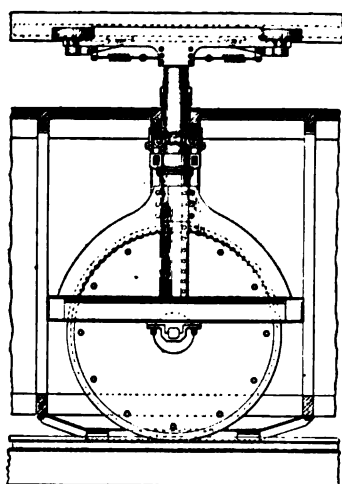
teur. La première contient, en outre des organes habituels de manœuvre des moteurs, les appareils de commande des freins, qui sont au nombre de deux, un frein

[1] Ces chaînes ont été essayées pendant quinze jours à la vitesse de 620 tours : m., sans donner lieu à aucun inconvénient, au dire des constructeurs.

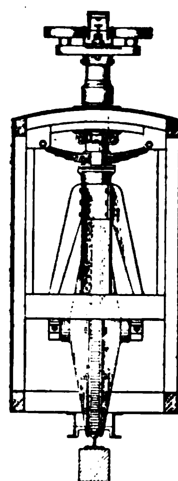
ordinaire à sabots et un frein spécial basé sur la résistance de l'air; ce dernier se compose de 16 volets verticaux articulés, disposés sur les deux pans coupés et manœuvrés au moyen d'une transmission à vis sans fin. La partie centrale de la caisse est divisée en quatre compartiments pour les voyageurs; les sièges sont longitudinaux, adossés respectivement aux parois de la caisse et aux deux faces d'un tambour médian recouvrant les roues. On accède à l'intérieur de la voiture par trois portes; tout le plancher est de plain-pied et se trouve à 1,80 m. environ du sol. Même à pleine charge, le centre de gravité de l'ensemble reste toujours au-dessous du rail de roulement [1].

L'ensemble de la voiture pèse environ 55 t., dont 12 t. pour les moteurs.

Le courant est capté par deux galets en bronze conduits par des bielles et roulant sur un conducteur formé d'un fer en ⊓ fixé sur les traverses au moyen



Elévation longitudinale.



Elévation transversale.

Fig. 465. — Chemin de fer bicycle Boynton. — Détails d'une roue motrice.

d'isolateurs en porcelaine. Le retour se fait par les roues et par l'ossature métallique de la voie.

La régulation des moteurs s'effectue par la méthode série-parallèle.

La station génératrice a une puissance de 1 000 chev. et le courant est produit à la tension de 750 volts.

On compte procéder avec cette installation à une série d'expériences de traction à très grande vitesse. La voie est construite de manière à pouvoir résister avec sécurité aux efforts qui se produiront à l'allure de 250 km. à l'heure.

A la vitesse de 150 km : h. la voiture pourra s'arrêter sur une distance de 1 000 à 1 200 m.

[1] On trouvera plus de détails que nous n'en pouvons donner ici sur ce matériel dans l'*Engineering* des 11, 18, 28 juin et 9 juillet 1897 et dans le *Bulletin de la Commission internationale du Congrès des chemins de fer*, juillet 1897.

D'après M. Behr, le coût d'une grande ligne équipée d'après ce système, y compris le matériel roulant, la station génératrice et tout ce qui est nécessaire à l'exploitation, mais non compris l'achat des terrains, ne dépasserait pas 150 000 fr. par km.

Il serait téméraire d'affirmer dès maintenant que toutes les difficultés ont été résolues et qu'il ne se produira aucun accroc dans le fonctionnement du système, qui nous paraît bien audacieux. Mais, quel que soit le résultat final, la tentative est intéressante et fait honneur à son auteur.

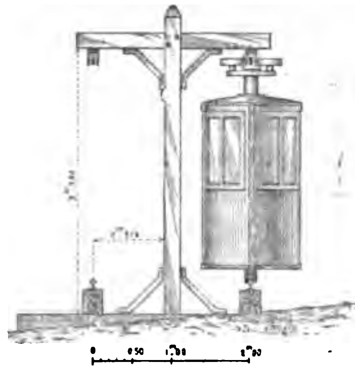


Fig. 466. — Chemin de fer bicycle Boynton. — Coupe transversale de la voie et vue en bout de la voiture.

Système bicycle. — Le type du second système de voie monorail est le chemin de fer bicycle *Boynton*, dont un spécimen fonctionne depuis 1893 à Bellport, Long Island, près de New-York. Dans ce système, la voie peut être au niveau du sol ou surélevée. Le véhicule, porté par des roues à double boudin de 1,50 m. de diamètre qui roulent sur un rail porteur, est guidé à sa partie supérieure par un autre rail suspendu à des potences. Ce second rail est embrassé à cet effet par deux galets à axe vertical, qui sont portés par un bâti solidaire des boîtes d'essieu, de façon que les mouvements d'oscillation de la caisse n'influent pas sur la position des galets de guidage (fig. 465). Chacune des roues motrices est attaquée directement par un moteur multipolaire à inducteurs fixes et induit mobile, enfermé dans la roue. Le courant est capté sur le rail-guide par des frotteurs spéciaux, qui se voient sur la figure 465.

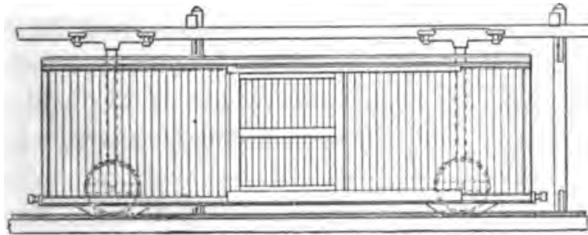


Fig. 467. — Chemin de fer bicycle Boynton. — Elévation d'un wagon à marchandises.

La caisse mesure 15,50 m. de longueur, 1,20 m. de largeur et 2,30 m. de hauteur, et est divisée par des cloisons transversales en six compartiments de quatre places chacun. Il y a une cabine de mécanicien à chaque extrémité. Le poids de la voiture en charge est de 6 t. seulement.

La figure 466 montre la vue en bout de cette voiture et la figure 467 l'élévation d'un wagon à marchandises couvert du même système, pesant 3,5 t. et pouvant recevoir une charge utile de 7 t.

Avenir des systèmes monorails. — Quelques essais de marche à grande vitesse ont été tentés sur le chemin de fer bicycle de Long Island, mais sans succès bien marqué : on n'a guère réalisé que 95 km : h., pendant un temps très court. Quant au système Lartigue-Behr, il paraît prudent, avant de se prononcer sur son adaptabilité aux grandes vitesses, d'attendre les résultats de l'expérience en cours à Bruxelles.

Mais il est un autre champ d'application plus vaste où le système monorail pourrait, semble-t-il, trouver dès maintenant, dans bien des cas, un emploi avantageux : nous voulons parler des chemins de fer à faible trafic, voies ferrées industrielles ou agricoles, voies coloniales, dernières ramifications des réseaux de chemins de fer secondaires, qui ne peuvent exister qu'à condition d'être construites et exploitées avec la plus stricte parcimonie.

Pour des lignes de ce genre, dont le trafic s'accommode d'un matériel léger et marchant à faible vitesse, la voie à rail unique surélevé, genre Lartigue, se recommande, principalement dans les terrains difficiles et quand on ne peut suivre les chemins existants, par l'économie qu'elle procure, même par rapport à la voie étroite, dans les dépenses de plate-forme. Cette économie est surtout sérieuse dans les terrains tourmentés au point de vue du tracé en plan, parce que le système monorail permet d'adopter pour les courbes des rayons très réduits de 25 ou 30 m., et elle s'augmente par la possibilité de supprimer les ouvrages pour l'écoulement des eaux [1].

Mais ce système n'acquerrait vraiment toute sa supériorité qu'avec la traction électrique, qui permettrait de réaliser un matériel roulant d'un poids minimum et une voie d'une légèreté correspondante, au lieu de la structure forcément lourde nécessitée par le passage de locomotives à vapeur.

L'équipement électrique d'une voie de ce genre pourrait

[1] La voie surélevée présente en outre l'avantage qui, dans certains cas, peut être déterminant, de pouvoir difficilement être obstruée par des accumulations de neige ou de sable.

d'ailleurs se faire à très peu de frais, en fixant un rail spécial par des isolateurs sur les supports de la voie, ou même à la rigueur en utilisant comme conducteurs les rails de guidage eux-mêmes convenablement isolés et connectés, le rail de roulement servant en tout cas pour le retour du courant.

L'expérience déjà acquise avec ce type de voie, notamment sur la ligne de Listowel à Ballybunion, en Irlande, prouve d'ailleurs qu'il peut desservir avec sécurité et dans des conditions de vitesse très acceptables un trafic modéré de voyageurs et de marchandises, tel que celui que nous avons en vue. Quant aux frais d'exploitation, il paraît difficile qu'ils ne soient pas inférieurs à ceux d'une voie ordinaire.

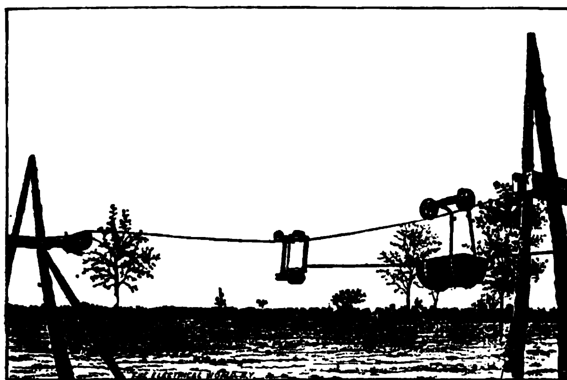


Fig. 468. — Vue d'une installation de « telpherage ».

Dans bien des cas, l'adoption de la voie monorail pourrait donc faciliter l'établissement de chemins de fer dans les régions qui en sont actuellement dépourvues et permettre la mise en valeur, dans des conditions financières satisfaisantes, de leurs éléments de prospérité.

Pour les exploitations industrielles, agricoles, minières, les chantiers de travaux, etc., les monorails électriques paraissent également appelés à rendre de bons services.

Enfin, nous citerons en passant, dans le même ordre d'idées, une catégorie spéciale de systèmes de transport comportant une voie funiculaire aérienne sur laquelle roulent de petits cha-

riots actionnés par des moteurs électriques. Le plus connu de ceux-ci est le « telpherage » du professeur *Fleeming Jenkin*, dont la principale particularité est que le câble porteur sert en même temps de conducteur de courant, ce qui entraîne pour la distribution des dispositions ingénieuses[1], mais compliquées; le réglage de la vitesse s'opère automatiquement. Ce système qu'on peut modifier peut être installé d'une façon très rudimentaire, comme le montre la figure 468. Il en existe deux ou trois applications en Angleterre qui donnent des résultats pratiques satisfaisants.

§ 3. — Traction sur fortes rampes

Généralités. — Tant que les rampes sont inférieures à 100 mm. par mètre, un train formé entièrement d'automobiles peut les franchir assez facilement. Le matériel roulant présente seulement quelques difficultés de construction, par suite de la nécessité de loger dans le truck des moteurs plus puissants qu'à l'ordinaire : pour mouvoir une automobile de 15 tonnes en charge sur une rampe de 9 à 10 mm., par exemple, à la vitesse très réduite de 14,4 km : h. ou 4 m : s., il ne faut pas moins de 80 chev. Cette difficulté croît lorsqu'on emploie la voie étroite, comme c'est ordinairement le cas pour les lignes de montagne.

On pourra, en général, satisfaire à ces exigences de la façon la plus simple par l'emploi du matériel à bogies, qui permet de réaliser facilement des automobiles de 100 chev. à voie de 1 m. et même de 0,75 m., comme le montre l'exemple des voitures de la Haute-Silésie, et se prête au passage dans des courbes de faible rayon. On verra plus loin (p. 42) une autre disposition à 4 moteurs sur deux essieux, également applicable.

Dans le cas où l'on reculerait devant l'emploi de 4 moteurs et où l'on n'aurait pas de courbes trop raides, on pourrait recourir à une autre disposition, due à M. *Auvert* et qui consiste (fig. 469) dans l'emploi de moteurs à arbre parallèle à la voie, attaquant les essieux par engrenages coniques comme les moteurs Sperry. En

[1] On trouvera des détails sur ces dispositions, ainsi que sur celles des autres systèmes analogues, dans l'ouvrage déjà cité de MM. Martin et Wetzler, *The Electric Motor*.

adoptant un empattement analogue à celui des voitures de chemins de fer ordinaires, on peut de cette manière loger dans le truck des moteurs de grand diamètre et aussi allongés qu'on le désire. C'est ainsi que seront équipées les voitures de la ligne du Fayet à la frontière suisse par Chamonix, dont nous avons déjà dit quelques mots plus haut (t. I, p. 355 et 497)[1]. Les deux moteurs, de 50 chev. chacun, seront suspendus par leur centre de gravité à deux longerons reposant directement sur les boîtes à huile; les roues d'engrenages attaquées par les pignons coniques seront folles sur

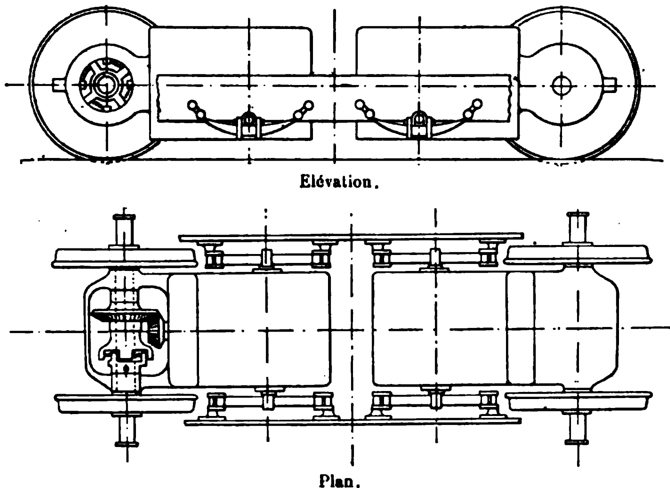


Fig. 469. — Schéma du montage de deux moteurs à arbre parallèle à la voie sur une automobile pour fortes rampes.

les essieux et entraîneront ceux-ci par l'intermédiaire d'embrayages élastiques, formés de deux croisillons réunis par des ressorts. Ce

[1] Cette ligne, à voie de 1 m., dont la longueur sera de 38 km., remontera la vallée de l'Arve pendant 30 km. environ à partir du Fayet et sera alimentée en énergie électrique par trois puissantes stations génératrices utilisant des chutes d'eau de l'Arve.

Les rampes sont très fortes et atteignent 90 mm. par mètre ; avec de telles inclinaisons on n'aurait pu appliquer la traction à vapeur qu'à l'aide d'une crémaillère. D'après les renseignements qu'a bien voulu nous fournir gracieusement M. Baudry, ingénieur en chef de la traction, on avait pensé d'abord à recourir à la même méthode pour la traction électrique et à construire des locomotives électriques mixtes fonctionnant tantôt à l'aide de la crémaillère, tantôt par simple adhérence, comme les locomotives à vapeur du système Abt ; le projet de ces machines avait même été complètement étudié, comme nous le dirons plus loin ; mais on a reculé devant les tâtonnements qu'on craignait pour la mise au point de ce système et l'on a préféré se passer de la crémaillère en utilisant l'adhérence totale des trains, composés entièrement de voitures automotrices actionnées indépendamment, chacune par deux moteurs de

système est simple et puissant, mais il ne permet pas facilement l'emploi de grandes roues d'engrenages, ni de la double réduction de vitesse, et force par suite à adopter des moteurs assez lourds.

Lorsqu'il s'agit de faire franchir à des voitures électriques des rampes supérieures à 100 mm. environ, l'adhérence ordinaire devient pratiquement insuffisante et l'on est obligé d'y suppléer par des dispositifs spéciaux. Parmi ceux-ci, deux surtout sont employés, le système à contrepoids et le système à crémaillère.

I. — Système a contrepoids

Le premier peut être appliqué sous deux formes très différentes.

On peut d'abord, suivant un système bien connu par les « ficelles » de Lyon et les nombreux « funiculaires » de Suisse et d'ailleurs, employer un matériel roulant ordinaire en accrochant simplement la voiture montante à l'un des brins d'un câble qui passe sur un treuil placé à l'extrémité supérieure de la rampe et à l'autre brin duquel est fixé un contrepoids ou une voiture descendante. Les treuils de ces funiculaires étaient mus autrefois, quand on n'employait pas simplement un lest d'eau, soit par une machine à vapeur, soit par une machine hydraulique. Aujourd'hui que l'usage des moteurs électriques s'est répandu dans tous les engins de levage, on les a tout naturellement appliqués à la commande de ces treuils dans toutes les installations nouvelles où l'on a trouvé avantage à recourir à la transmission du travail à distance ; aussi le nombre de ces funiculaires électriques s'est-il rapidement accru :

50 chev. à engrenages. Ces voitures, au nombre maximum de 5 entre le Fayet et Chamonix et de 3 entre Chamonix et la frontière suisse, seront de trois sortes : des fourgons pour bagages et messageries, des voitures à voyageurs à couloir central et plateforme à chaque extrémité, contenant 32 places de voyageurs de 1re et de 2e classe, et enfin des wagons à marchandises. Le premier véhicule de chaque train sera toujours un fourgon muni à l'avant d'un compartiment pour le mécanicien, qui manœuvrera par une transmission pneumatique les régulateurs et les freins de toutes les voitures.

Chaque véhicule sera muni de frotteurs de prise de courant glissant sur un rail isolé, d'un frein à sabots ordinaire qui pourra être serré soit à la main par un agent, soit à distance par le mécanicien au moyen de l'air comprimé à la façon du frein Westinghouse, et enfin d'un frein de sûreté supplémentaire, manœuvré de même et formé de deux mâchoires venant presser contre les faces latérales d'un rail surélevé, qui sera placé dans l'axe de la voie dans toutes les sections où l'inclinaison dépassera 40 mm. par mètre.

Les trains de 5 véhicules pourront transporter 128 voyageurs et se succéderont de 15 en 15 minutes. Les moteurs des voitures sont calculés de façon à réaliser des vitesses de 10 à 11 km : h. sur la rampe de 90 mm. et de 35 à 40 km : h. en palier.

les plus connus sont ceux du Bürgenstock et du Stanserhorn, sur le lac des Quatre-Cantons, du San Salvatore, près de Lugano, d'Echo Mountain, près de Pasadena (Californie), etc.

Ces derniers funiculaires ne diffèrent des autres ni au point de vue du principe ni au point de vue du matériel roulant; le fait d'actionner le treuil par un moteur électrique fixe n'empêche pas que ce soient de simples ascenseurs sur rampe; nous ne les comprendrons donc pas dans les applications de la traction électrique[1].

Un second système, qui rentre au contraire directement dans notre sujet, est celui où des voitures électriques utilisent leur propre puissance pour franchir des rampes avec l'aide d'un contrepoids dont elles sont rendues solidaires par un câble à mouvements alternatifs. Le travail à effectuer est seulement la différence entre ceux de la montée du véhicule et de la descente du contrepoids, ou inversement; il peut être aisément et tout naturellement produit par les moteurs mêmes de la voiture ou des voitures quand on utilise comme contrepoids une seconde automobile.

Il existe en Amérique diverses applications de ce procédé soit à des lignes funiculaires spéciales comme celles de Great Falls et du mont Tom[2], soit à des tramways électriques à fortes rampes, tels que ceux de Seattle, Portland, Providence, San Francisco, etc., sur lesquels il a permis d'éviter tout transbordement de voyageurs. Dans cette dernière application, qui est la plus intéressante, pour ne pas créer d'obstacle à la surface de la chaussée, on a dû placer les deux brins du câble à mouvements alternatifs dans des caniveaux souterrains à rainure supérieure.

Nous décrirons à titre d'exemples deux de ces installations de tramways, l'une à contrepoids séparé (ligne à simple voie), l'autre à équilibrage de voitures (ligne à double voie).

Exemple d'installation à contrepoids séparé (Providence). — Le plan incliné sur lequel a été installé, dans la ville de Providence, le système à contrepoids que nous allons décrire présente des déclivités de 75, 85, 140 et 150 mm. par

[1] Ceux de nos lecteurs que ces funiculaires intéresseraient en trouveront d'ailleurs d'excellentes descriptions dans le travail très complet du Dr Du Riche Preller, « Mountain Electric Railways », *Engineering*, 1894-1895.

[2] On trouvera une description de la ligne du mont Tom dans la *Street Railway Review*, 15 juillet 1897; c'est un simple funiculaire de 1 500 m. de longueur, exploité au moyen de véhicules automoteurs.

mètre ; il mesure horizontalement 215 m. de longueur. Il faisait autrefois partie d'un tramway funiculaire, dont les caniveaux ont été conservés ; la ligne électrique actuelle emprunte l'une des anciennes voies à câble.

La figure 470 montre schématiquement le profil de la ligne et la disposition générale du système. Il comprend comme organe essentiel un câble sans fin qui s'enroule sur deux poulies placées l'une au sommet, l'autre au pied de la rampe (cette dernière munie d'un tendeur), et auquel est attaché à demeure

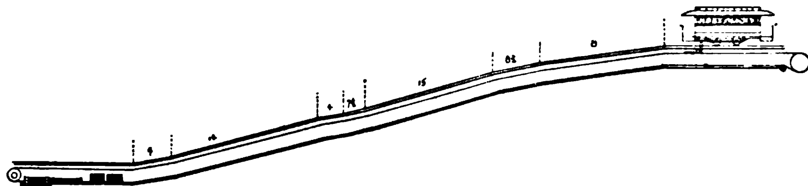


Fig. 470. — Disposition schématique de l'installation à contrepoids de Providence et profil en long de la ligne.

un contrepoids. L'un des brins du câble suit le caniveau existant sous la voie ; l'autre se meut avec le contrepoids dans un second caniveau souterrain, parallèle au premier, mais entièrement fermé, et qui mesure 0,40 m. sur 0,95 m. (fig. 471). Des galets à axe horizontal soutiennent ce câble de distance en distance et d'autres galets à axe vertical ou incliné le guident dans les courbes. Les contrepoids, au nombre de deux, pèsent ensemble 5 000 kg. ; ce sont des blocs de fonte, montés sur quatre galets de 0,25 m. de diamètre, qui viennent buter au bas de leur course contre deux cylindres amortisseurs à air. Les tiges des pistons de ces cylindres sont ensuite tirées par les contrepoids eux-mêmes lorsqu'ils remontent la rampe.

Le système fonctionne de la façon suivante : supposons les contrepoids en

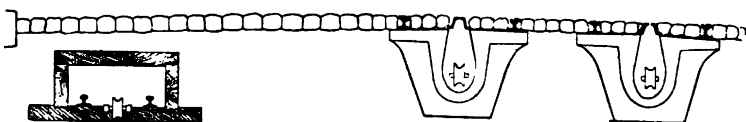


Fig. 471. — Installation à contrepoids de Providence. — Coupe transversale de la voie.

haut de leur course, dans la partie en palier ; une voiture arrivant au pied de la rampe saisit le câble et monte avec l'aide des contrepoids ; une fois arrivée en haut, elle lâche le câble, laissant les contrepoids au bas de leur course, d'où ils sont remontés par la voiture descendante suivante. La seule sujétion du système est qu'une voiture descendante doit toujours succéder immédiatement à uue voiture montante et inversement.

La figure 472 montre le mode de liaison de la voiture avec le câble. Un tenon A, fixé au câble par une languette et qui fait saillie hors de la rainure du caniveau, s'engage automatiquement dans une douille portée par la voiture en repoussant le cliquet à ressort D ; il y est maintenu en place par un verrou B, calé par une came C qu'il suffit de faire tourner en tirant sur la tringle G pour dégager le tenon.

Les voitures électriques de Providence pèsent à vide 5,6 t. environ et franchissent la rampe sans difficulté avec leurs deux moteurs en parallèle, à une vitesse égale à celle qu'elles prendraient sur une rampe de 4 p. 100. En

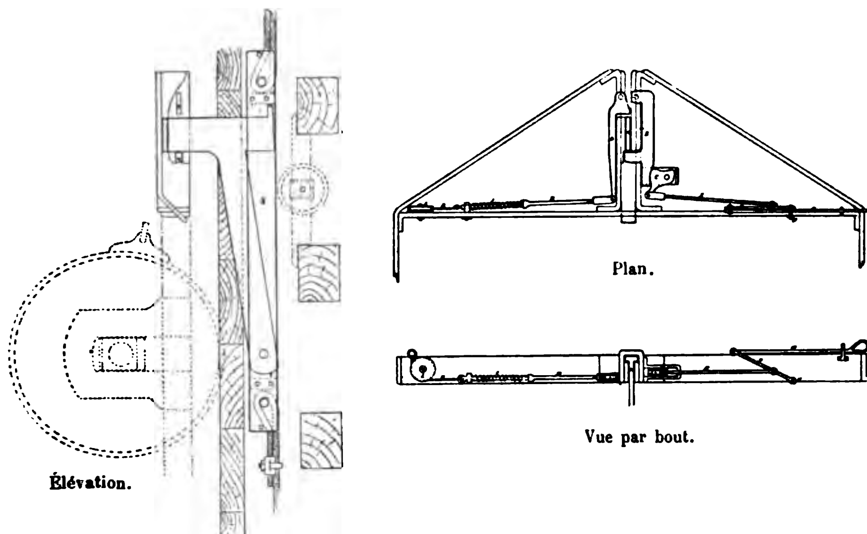


Fig. 472. — Installation à contrepoids de Providence. — Mode de liaison de la voiture avec le câble.

descendant la rampe, il faut également, pour vaincre les résistances passives, conserver les moteurs en action, mais en les groupant en série avec un rhéostat, sauf quand la voiture est très chargée.

Les systèmes à contrepoids de Seattle et de Portland sont très analogues, sauf que les deux brins du câble se meuvent dans la même conduite; dans

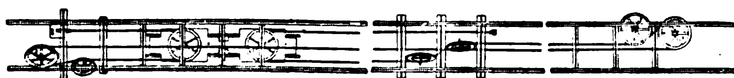


Fig. 473. — Autre installation à contrepoids à Providence. — Schéma de l'enroulement du câble.

la première de ces deux villes, la déclivité atteint 16 p. 100 sur une longueur de 100 m.; dans la seconde, elle ne dépasse pas 14 p. 100.

Une nouvelle installation du même genre qui vient d'être faite à Providence se distingue de l'ancienne par la disposition des deux caniveaux, placés l'un au-dessus de l'autre, et par l'enroulement du câble, qui est établi de telle sorte que la course du contrepoids et par suite la longueur du caniveau correspondant ne soient que la moitié de la longueur du plan incliné (fig. 473). De plus, l'exploitation est faite au moyen d'un véhicule remorqueur spécial, ce qui

obvie à la sujétion de faire toujours alterner une voiture montante et une voi-

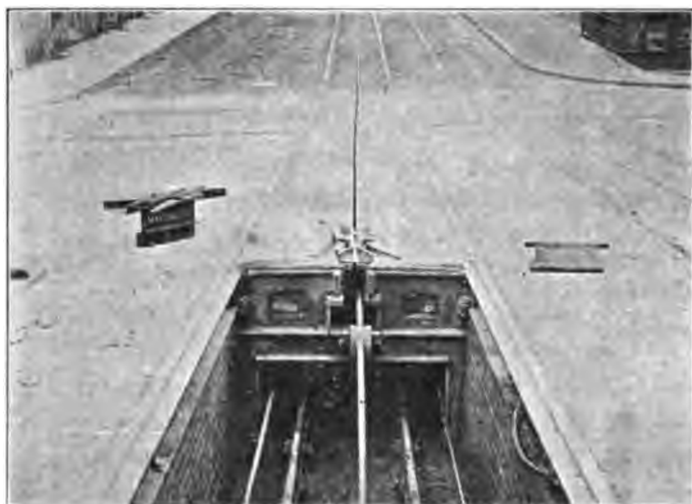


Fig. 474. — Autre installation de Providence. — Vue des caniveaux et du grip.

ture descendante. La figure 474 montre les caniveaux, avec l'appareil servant à la liaison de la voiture avec le câble, et la figure 475 l'un des contrepoids.

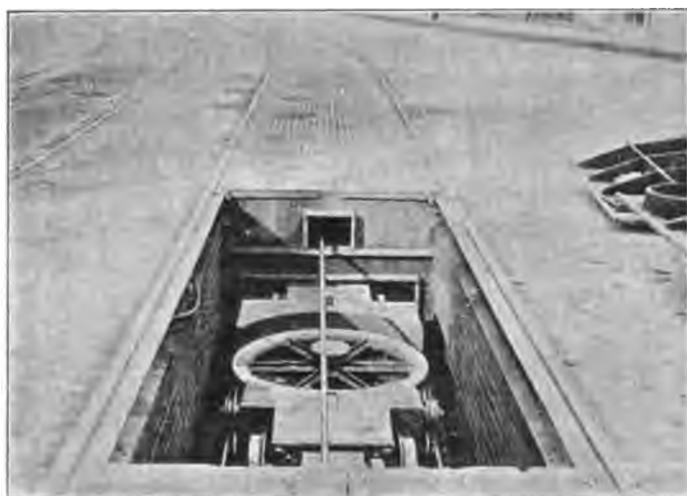


Fig. 475. — Autre installation de Providence. — Vue de l'un des contrepoids.

Une observation intéressante faite à Providence est que le tenon frottant contre le fer de rainure constitue un excellent retour pour le courant, qui

emprunte en majeure partie cette voie au lieu de passer par les rails, toujours fortement sablés.

Exemple d'installation à équilibrage de voitures (San Francisco). — L'installation de San Francisco est à double voie; les déclivités y atteignent 24 et 25,4 p. 100 sur 200 m. de longueur. Elle se compose essentiellement, comme les précédentes, d'un câble sans fin passant sur deux poulies établies au pied et au sommet de la rampe; les deux brins du câble suivent respec-

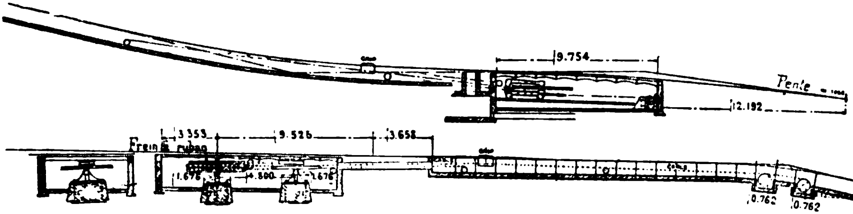


Fig. 476. — Installation à équilibrage de voitures de San Francisco. — Disposition des poulies aux extrémités de la rampe.

tivement l'axe de chacune des voies dans un caniveau construit sur le modèle des caniveaux funiculaires. Mais il n'y a plus ici de contrepoids fixé à demeure au câble; l'horaire est combiné de telle façon que deux voitures marchant en sens inverse se trouvent toujours en même temps sur la rampe : ces deux voitures saisissent à la fois le câble, et la voiture descendante, aidée au besoin de ses moteurs, élève la voiture montante.

Le câble, en acier, a 32 mm. de diamètre et une résistance à la rupture de

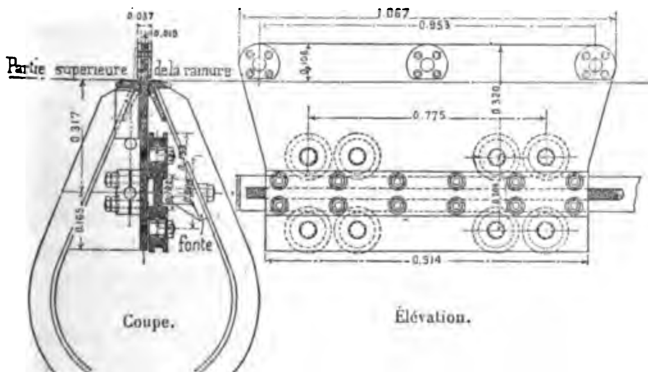


Fig. 477. — Installation à équilibrage de voitures de San Francisco. Détails du grip.

62 t.; la plus forte charge qu'il puisse avoir à supporter étant formée par deux voitures pesant 7 t. chacune, qui, sur la pente de 25,4 p. 100, imposent au câble un effort de 3,5 t. seulement, le facteur de sécurité est de près de 18.

Au sommet de la rampe sont installées (fig. 476), dans une fosse spéciale, deux poulies en fonte, l'une de 3 m. de diamètre, servant de poulie d'inflexion, et l'autre de 3,60 m. de diamètre, à double gorge, sur laquelle le câble fait deux tours. Cette dernière est munie d'un frein à ruban permettant d'arrêter tout le système. Une seconde fosse, placée au pied de la rampe, contient une autre poulie de 3,60 m. de diamètre, montée sur un chariot tendeur.

L'appareil servant à établir la liaison entre la voiture et le câble[1] se compose essentiellement (fig. 477) d'une plaque en acier de 19 mm. d'épaisseur et 0,90 m. environ de longueur, fixée à demeure sur le câble au moyen de mâchoires boulonnées. Ce « grip » est guidé à hauteur constante à l'intérieur du caniveau par quatre paires de galets à gorge verticaux, qui roulent sur une barre de guidage s'étendant sur toute la longueur. La partie supérieure de la plaque dépasse les fers de rainure d'une dizaine de centimètres, sauf aux

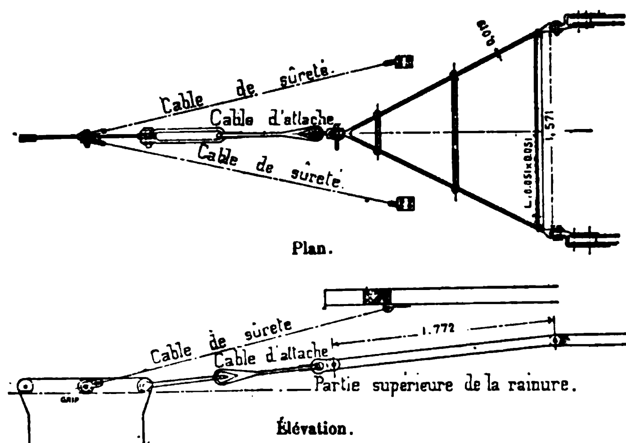


Fig. 478. — Installation à équilibrage de voitures de San Francisco. — Détails de l'attache du grip avec la voiture.

deux extrémités de la rampe, où elle s'enfonce dans le caniveau de manière à ne plus faire aucune saillie à la surface de la chaussée. L'attache du grip avec la voiture est faite (fig. 478) au moyen d'un bout de câble en acier, de 19 mm. de diamètre, fixé à l'une des extrémités de la plaque et qui se relie par un maillon et un goujon à une barre d'attelage en forme de V, articulée sur le châssis du truck; deux câbles de sûreté de 16 mm. de diamètre, attachés au milieu de la plaque, sont en outre accrochés aux angles du châssis inférieur de la caisse.

Lorsqu'une voiture descend sur la voie de droite, elle laisse le grip correspondant au bas de la rampe; la voiture qui monte en même temps sur la voie de gauche laisse l'autre grip en haut; il faudrait, par suite, intervertir la position de ces deux appareils pour permettre le passage des deux voitures suivantes sur les mêmes voies. Pour éviter la perte de temps qui

[1] Appelé « grip », par analogie avec l'appareil similaire des tramways funiculaires.

en résulterait, on a disposé au pied et au sommet de la rampe deux changements de voie symétriques, au moyen desquels on dirige alternativement les voitures sur l'une et l'autre voie.

Comme mesure de sécurité, on a établi à peu de distance en amont du plan incliné une aiguille de déraillement, que le conducteur de la voiture descendante est obligé d'ouvrir avant de passer.

Une fois cette aiguille faite, les deux voitures descendante et montante sont accrochées au câble, le conducteur de la première avertit l'autre par un signal qu'il est prêt et, dès que ce dernier a répondu, la voiture descendante se met en marche, entraînant avec elle tout le système [1].

Une voiture vide, équipée avec deux moteurs G.E. 800, descendant la rampe avec ses moteurs en série, est capable d'élever à elle seule jusqu'au sommet une voiture chargée à la vitesse de 6,5 km. à l'heure. Lorsque les deux voitures sont également chargées, la voiture descendante recevant seule du courant, la consommation de courant à la vitesse de 7,2 km. à l'heure varie de 40 à 27,5 ampères, ce qui correspond à une puissance dépensée de 20 à 14 kw., suivant que la voiture descendante est sur la rampe de 24 p. 100 et la voiture montante sur la rampe de 25,4 p. 100 ou inversement. Le mécanicien de la voiture remorquée peut d'ailleurs arrêter l'ensemble du système en se servant de son frein à main seulement.

La durée totale des opérations d'accrochage des voitures, de traversée du plan incliné et de décrochage ne dépasse pas 2,5 minutes.

Malgré un certain manque de flexibilité, qui est le défaut commun à toutes les installations de ce genre, elles peuvent néanmoins rendre des services dans des cas spéciaux, pour faire franchir une rampe exceptionnelle à des voitures électriques appelées à circuler sur d'autres parties de ligne à simple adhérence.

II. — Système a crémaillère

Généralités et historique. — La traction par crémaillère est d'une application plus générale.

Les dispositifs varient, mais, en tout cas, leur principe bien connu consiste à placer entre les deux rails une crémaillère avec

[1] Deux difficultés seulement se présentent dans l'exploitation : la descente de la première voiture et la montée de la dernière (la remise est en amont de la rampe). Pour la seconde de ces opérations, on se sert d'une voiture contrepoids spéciale, qu'on amène en haut de la rampe une fois le service fini et qui sert à remonter la dernière voiture ; ce véhicule passe la nuit au pied du plan incliné et, le lendemain matin, il est remonté par la première voiture descendante. On peut d'ailleurs parfaitement mettre plus d'une voiture en service au delà de la rampe, car une voiture descendante est capable de remonter deux voitures montantes, à condition que les moteurs des deux voitures soient mis simultanément en marche. Le frein à ruban mentionné plus haut sert à descendre ces voitures supplémentaires.

laquelle engrènent des roues dentées mues par les moteurs de la voiture.

L'origine des lignes électriques à crémaillère remonte aux débuts même de la traction électrique.

La première, à notre connaissance, a été construite en 1887 dans les rues de Pittsburg par la *Daft Electric Co.* La ligne (Pittsburg, Knoxville and St. Clair Street Ry.), qui mesurait 2,5 km. de longueur, présentait une rampe moyenne de 6 p. 100, s'élevant en certains points jusqu'à 15,5 p. 100. Partout où la déclivité dépassait 10 p. 100, on crut prudent, en raison du climat très mauvais de Pittsburg, d'équiper la voie avec une crémaillère formée d'une

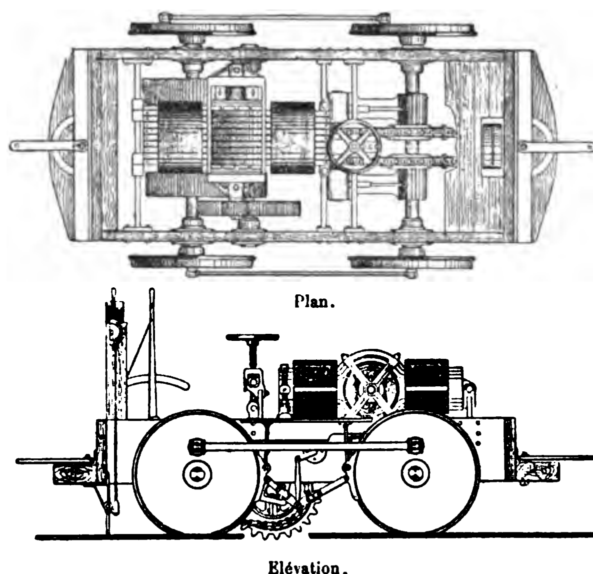


Fig. 479. — Locomotive électrique à crémaillère Daft.

simple bande de tôle longitudinale perforée, avec laquelle une roue dentée montée sur la locomotive pouvait être mise en prise à volonté. La figure 479 montre la vue d'ensemble de cette locomotive ; un moteur de 30 chev. à double réduction attaquait l'un des essieux ; les quatre roues étaient accouplées par bielles, et le second essieu actionnait par l'intermédiaire de deux chaînes de Galle l'arbre de la roue dentée, qu'on pouvait relever ou abaisser à l'aide d'une vis et d'un volant à main. La machine pesait 6 t. et remorquait une voiture de 40 places pesant 5 t. en charge à la vitesse moyenne de 9,6 km. à l'heure, réduite à 4,8 km. sur les fortes rampes.

Choix entre les divers types de crémaillères. — Notre intention n'est pas de décrire ici les voies destinées à la traction par crémaillère, pour lesquelles

nous renvoyons aux ouvrages spéciaux [1]. Nous rappellerons seulement qu'il existe actuellement trois catégories principales de crémaillères :

1° Les crémaillères *Riggenbach*, formées, comme le montre la figure 491 (p. 46), de deux fers en **C** parallèles et placés de champ, dont les montants verticaux retiennent des échelons formés de fers trapézoïdaux rivés à froid; le mécanisme moteur commande une roue dentée pleine qui engrène avec ces échelons;

2° Les crémaillères *Abt*, formées de lames verticales présentant à leur partie supérieure des dents découpées (fig. 496, p. 49); ces lames sont placées parallèlement côte à côte, au nombre de deux ou trois suivant l'effort de traction à réaliser, et de façon que les dents soient croisées et régulièrement alter-

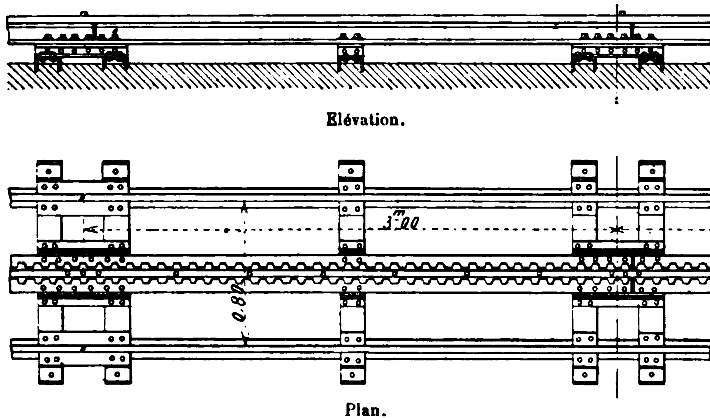


Fig. 480. — Crémaillère système Locher.

nées ; elles sont fixées dans des coussinets qui les entretoisent et assurent leur parallélisme; les roues dentées qui engrènent avec les lames parallèles sont formées d'autant de parties semblables, entraînées par l'arbre moteur, avec intermédiaire de ressorts qui assurent un certain jeu entre elles pour éviter les ruptures de dents ;

3° Enfin les crémaillères du système *Locher*, formées de deux lames horizontales à denture extérieure également horizontale et fixées sur des fers zorés (fig. 480); les roues dentées motrices sont au nombre de deux, à axe vertical et placées symétriquement par rapport à l'axe de la crémaillère double qu'elles attaquent sur les côtés.

Le choix entre ces différents types de crémaillère est assez facile à faire pour les applications de la traction électrique, suivant le genre de voie qu'il s'agit de desservir :

1° *Pour les voies sur plate-forme séparée*, le type de crémaillère le plus ordinairement employé et qu'on peut recommander en général est la crémaillère Abt, qui donne un mouvement plus doux que le système à échelons,

[1] Voir notamment l'intéressant ouvrage : *Chemins de fer à crémaillère*, par M. Lévy-Lambert.

permet une marche plus rapide et l'emploi de courbes de plus faible rayon, et enfin se prête à un effort de traction plus considérable. La crémaillère Riggenbach est d'une construction plus compliquée ; elle s'obstrue plus facilement et donne une marche plus saccadée, qui ne permet guère de dépasser la vitesse de 8 km. à l'heure. La crémaillère Locher est plus compliquée encore que la précédente, et surtout elle complique le mécanisme moteur; elle n'est donc pas à recommander en dehors des cas spéciaux où les autres systèmes deviennent insuffisants, c'est-à-dire sur les très fortes rampes comme celle du Pilate (48 p. 100) où les roues dentées ordinaires risqueraient d'échapper à la crémaillère; le système Locher donne dans ce cas plus de sécurité et permet en outre aux voitures de résister à l'effort de renversement du vent quand celui-ci est très violent. On peut encore obtenir ce dernier résultat avec la crémaillère Riggenbach par l'adjonction de galets qui pénètrent dans la gorge extérieure des fers en ⊏; mais la crémaillère Abt est inférieure à ce point de vue.

2° *Pour les voies sur chaussée*, la seule crémaillère utilisable est celle de Riggenbach, parce que les autres présentent nécessairement des parties saillantes. En la faisant assez basse pour qu'elle soit arasée au niveau supérieur de la chaussée, elle ne gêne pas sensiblement la circulation des voitures ordinaires, ainsi que l'a montré l'expérience de Barmen. Cette disposition permet de desservir les lignes établies partie sur chaussée et partie sur plateforme séparée. La seule précaution à prendre, c'est de nettoyer fréquemment la crémaillère et d'éviter les pierres roulantes qui pourraient venir se loger entre les échelons et faire dérailler les voitures.

Systèmes de traction électrique applicables sur crémaillère. — La traction par crémaillère constitue sans contredit un des cas d'application les plus avantageux de l'électricité, pour plusieurs motifs.

1° Le faible poids spécifique des moteurs électriques, 15 à 20 kg. par cheval, est bien inférieur au poids d'une machine à vapeur et de sa chaudière, qui ne descend guère au-dessous de 30 à 40 kg. par cheval. Le poids mort se trouve réduit d'autant.

2° La facile commande des essieux par les moteurs électriques et les procédés de réglage de la vitesse de ceux-ci permettent de réaliser des mécanismes beaucoup plus simples que ceux d'aucune locomotive à crémaillère à vapeur, ainsi qu'on le verra ci-dessous avec plus de détails.

3° L'encombrement très réduit des moteurs électriques, qui permet de les loger dans le truck, rend possible l'emploi d'automobiles ou de voitures locomotrices à voyageurs ou à marchandises, au lieu de locomotives séparées inutilisables pour le trafic.

La réduction considérable de poids mort qui en résulte augmente le rendement de la traction dans une proportion bien plus élevée encore que sur les lignes ordinaires (t. I, p. 491), par suite du faible tonnage utile remorqué sur les lignes à crémaillère et du rôle prépondérant du poids mort. Pour tirer le meilleur parti de ces propriétés, on ne doit recourir à des locomotives séparées et réservées au mécanisme que lorsqu'on emploie des trains très lourds rendant nécessaires des moteurs très puissants qui ne pourraient trouver place dans le truck, surtout sur des voies étroites telles que sont généralement les voies de montagne.

Dans ce qui suit, nous étudierons successivement ces deux cas. Nous rappellons d'abord que la traction sur crémaillère peut se faire par trois types de machines différents :

Les machines à *un seul mécanisme*, qui se divisent en machines *simples* et en machines *mixtes*, suivant que les roues porteuses sont indépendantes ou solidaires de la roue dentée de crémaillère ; dans les premières, tout l'effort de traction est supporté par la roue dentée ; dans les secondes, les roues porteuses contribuent pour une petite partie par leur adhérence au travail de traction total ;

Les machines à *deux mécanismes*, combinées en vue de la traction mixte, dans lesquelles les roues porteuses et la roue dentée, tout en restant indépendantes, sont actionnées chacune par un mécanisme spécial ; on met l'un ou l'autre de ces mécanismes en action suivant qu'on parcourt une partie de ligne avec ou sans crémaillère.

Sur les lignes entièrement à crémaillère, le choix n'a de raison d'être qu'entre les deux premiers systèmes et il dépend surtout du profil. Sur des rampes de 15 p. 100 et au-dessus, l'appoint que pourrait fournir l'adhérence des roues porteuses dans l'effort de traction total devient insignifiant[1] et il vaut mieux renoncer franchement à se servir de l'adhérence ordinaire, comme on l'a fait au Gornergrat et à la Jungfrau, par exemple ; on a alors des machines aussi peu compliquées et aussi légères que possible.

[1] En effet, la résistance due à la gravité étant voisine de 7 kg. par tonne et par millimètre d'inclinaison, le coefficient de traction nécessaire de ce chef seul sur une rampe de 150 mm. par mètre serait de 150 kg. ; l'effort adhérent ne dépassant pas 15 p. 100 du poids adhérent, on voit que l'effort de traction utilisable à la jante des roues porteuses ne serait que le 1/10 de l'effort total.

Pour des déclivités inférieures à 15 p. 100, on peut hésiter entre les deux dispositifs. Le système simple, n'utilisant pas l'adhérence, offre l'inconvénient de faire supporter tout l'effort de traction par la crémaillère et la roue dentée. Dans les machines mixtes, par contre, la solidarité des pignons dentés et des roues porteuses donne lieu à des glissements par suite de l'inégalité dans l'usure des deux systèmes de roues, les roues porteuses subissant de ce chef une diminution plus rapide de diamètre. Toutefois, il ne faut pas s'exagérer la valeur du travail ainsi perdu, car on montre facilement[1] qu'il n'a en réalité pas plus d'importance que le glissement en courbe des roues solidaires sur les files de rails intérieure et extérieure.

Sur les lignes où l'adhérence ordinaire et l'adhérence par crémaillère alternent suivant le profil, on doit recourir au système mixte ou au système à deux mécanismes.

La difficulté, dans le premier cas, avec les machines à vapeur, est de disposer le mécanisme moteur de façon à lui faire produire son maximum d'effet utile à la fois à faible vitesse, lorsque la crémaillère est en prise, et à une vitesse double ou triple lorsqu'on utilise l'adhérence seule. Avec la traction électrique, cette difficulté disparaît d'elle-même si l'on emploie plusieurs moteurs qu'on puisse coupler à volonté en série ou en parallèle, car on peut ainsi, comme on le verra au chapitre x, faire varier la vitesse dans la proportion de 1 au nombre total de moteurs employés ou à un sous-multiple. Cette solution est la plus simple de toutes pour les locomotrices ou les automobiles mixtes.

Quant au système à deux mécanismes, il pourrait être appliqué sous deux formes différentes : on pourrait songer d'abord à accoupler deux automobiles pourvues l'une d'un mécanisme à adhérence, l'autre d'un mécanisme à crémaillère ; on pourrait, en second lieu, commander les roues porteuses et les pignons dentés d'un même véhicule par deux groupes de moteurs distincts, comme dans les locomotives à vapeur du système Abt. Mais l'une ou l'autre de ces solutions entraînerait nécessairement une complication d'organes ou de matériel et une augmentation du poids des trains que rien

[1] Cf. *Les chemins de fer à crémaillère*, par M. Lévy-Lambert, p. 121.

ne justifie, puisque la régulation série-parallèle offre le moyen de faire marcher les moteurs à leur maximum de rendement tout en faisant varier la vitesse, comme nous venons de le dire.

Adaptation des moteurs au matériel roulant à crémaillère. — D'après les remarques précédentes, les seuls systèmes à considérer dans ce qui suit, sont les systèmes à mécanisme unique actionnant, soit la roue dentée seulement, soit la roue dentée et les essieux alternativement, soit les deux à la fois. Nous indiquerons rapide-

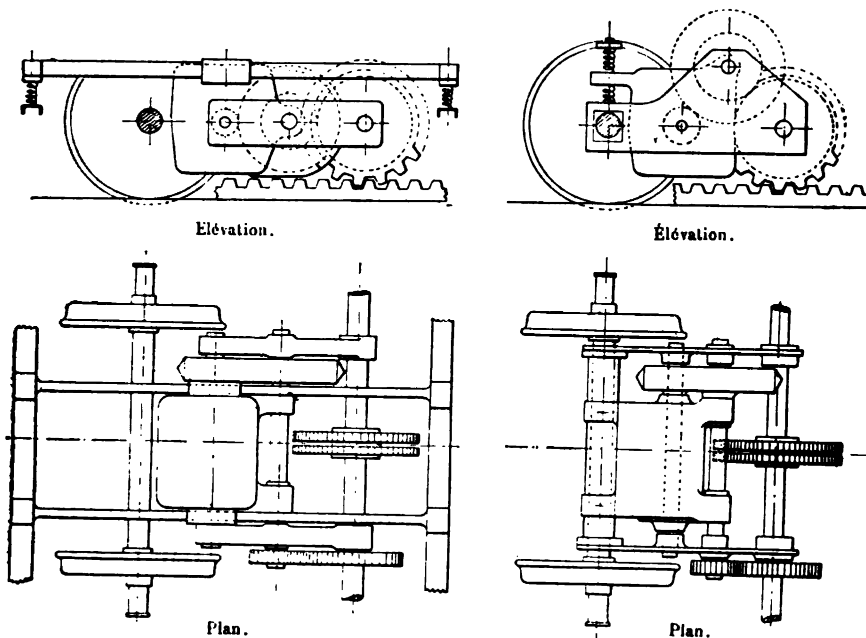


Fig. 481. — Moteur à action simple attaquant par engrenages à double réduction un pignon de crémaillère calé sur un faux essieu.

Fig. 482. — Dispositif permettant de réduire l'encombrement d'un mécanisme simple à double réduction avec faux essieu.

ment les dispositions des moteurs et des transmissions mécaniques qui nous paraissent le plus convenables dans chacun de ces trois cas.

Auparavant, nous ferons remarquer d'une manière générale que la difficulté de la transmission réside principalement dans la distance relativement grande qu'il faut laisser entre l'arbre du moteur et celui qui porte la roue dentée, pour que celle-ci ne vienne pas

toucher l'enveloppe extérieure du moteur [1]. Cette sujétion rend impossible l'emploi d'un seul train d'engrenages, et il faut forcément recourir à la double réduction ou à la vis sans fin. Nous ne nous occuperons pas ici de celle-ci pour les motifs indiqués précédemment (t. I, p. 114); mais, bien étudiée, cette solution ne serait peut-être pas à dédaigner dans certains cas, au point de vue de la réduction du poids et de l'encombrement.

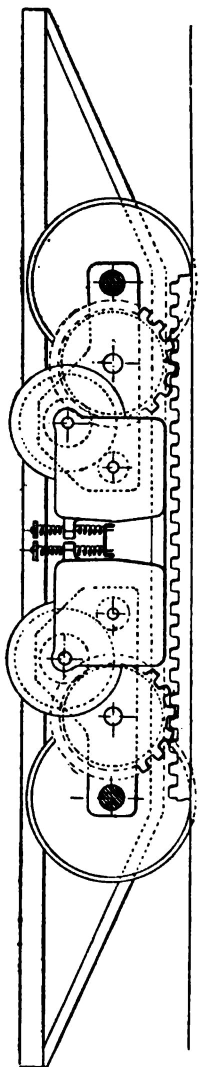


Fig. 483. — Truck à deux moteurs à action simple et double réduction avec pignons de crémaillère calés sur des faux essieux.

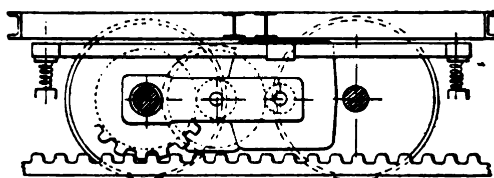
La transmission par engrenages à double réduction est d'ailleurs assez rationnelle, car, les vitesses étant très faibles sur tout le parcours, il y a avantage à réduire le nombre de tours plus que ne le permet un train d'engrenages simple; on peut alors coupler normalement les moteurs en parallèle et se réserver l'emploi du couplage en série pour les démarrages et les ralentissements.

1° *Matériel à action simple.* — A part la difficulté que nous venons de signaler, la construction du matériel à action simple est des plus faciles : il suffit de fixer la roue dentée sur un faux essieu qu'on attaque par un moteur comme l'essieu ordinaire des automobiles à adhérence; le moteur peut être suspendu de l'autre côté sur l'essieu voisin, comme le montre le croquis de la figure 481.

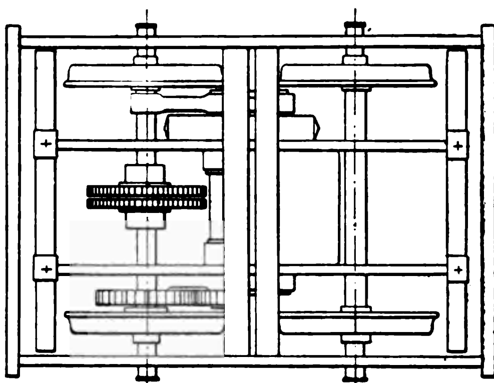
L'inconvénient de cette disposition, lorsqu'on place l'arbre de renvoi dans le plan horizontal des deux autres, c'est qu'elle exige un écartement assez

[1] Cette difficulté disparaîtrait si la crémaillère pouvait être placée sur le côté de la voie, contre un des rails, car la roue dentée pourrait alors venir en dehors du moteur; mais cette disposition serait mauvaise au point de vue de la voie et de la bonne marche du matériel, à moins qu'on n'établisse de part et d'autre deux crémaillères symétriques, ce qui serait compliqué et coûteux.

considérable entre l'essieu et le faux essieu ; comme il faut au moins deux moteurs sur une automobile à crémaillère, on se trouve ainsi conduit à augmenter beaucoup l'empattement de la voiture, tandis qu'on devrait au contraire le réduire en raison des courbes à faible rayon qu'on rencontre forcément sur les voies de montagne.



Élévation.



Plan.

Fig. 484. — Truck à un moteur à action simple avec pignon de crémaillère concentrique à l'un des essieux.

Pour éviter cette difficulté, on peut placer l'arbre de renvoi au-dessus des deux autres (fig. 482), en réunissant les trois arbres par des flasques triangulaires. Cette disposition a été appliquée au Salève (fig. 483), mais avec les moteurs placés au centre et non près des essieux ; les deux roues dentées sont ainsi plus espacées, ce qui constitue un certain désavantage pour le passage en courbe. La roue de l'engrenage intermédiaire, si elle dépasse le niveau supérieur du châssis, doit être logée sous les banquettes de la voiture, ce qui ne présente aucune difficulté.

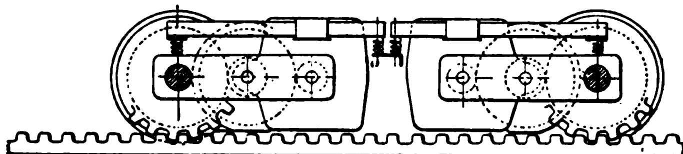


Fig. 485. — Truck à deux moteurs à action simple avec pignons de crémaillères concentriques aux essieux.

Pour gagner de la place, on peut aussi monter le pignon de crémaillère et la roue dentée qui le commande sur un arbre creux

entourant l'essieu; cette disposition est d'autant plus recomman dable que la vitesse de rotation de ce pignon et celle de l'essieu sont toujours fort peu différentes, et les frottements par suite peu importants. Ce dispositif convient bien, par exemple, pour des bogies à un seul moteur (fig. 484).

Pour réaliser des trucks à deux moteurs, on peut placer ceux-ci soit à l'extérieur, soit à l'intérieur (fig. 485); dans ce dernier cas, on réalisera une forme plus ramassée en confondant en une seule les deux roues dentées, comme le montre la figure 486.

Toutes ces dispositions sont satisfaisantes au point de vue de la suspension élastique des moteurs, dont la moitié du poids repose

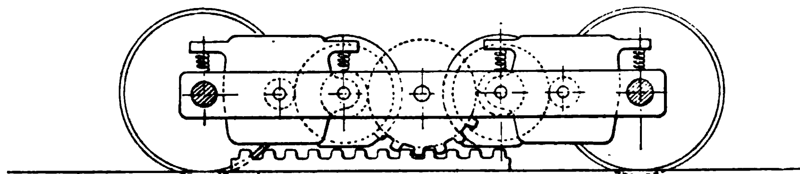


Fig. 486. — Truck à deux moteurs à action simple avec pignon de crémaillère unique au centre.

sur l'essieu et l'autre sur le faux essieu et par là sur la roue de crémaillère, qu'il est utile de charger pour la maintenir en prise. En supportant les boîtes à graisse de cet essieu par des ressorts, on peut du reste décharger cette roue autant qu'on le veut; on peut, au contraire, si on le juge utile, la charger davantage en utilisant le faux essieu comme essieu porteur. Dans tous les cas, pour éviter la rupture des dents de crémaillère, la suspension élastique sur la roue dentée est tout à fait nécessaire.

Les dispositifs précédents suffiront, en général, pour les automobiles et même pour les locomotrices. L'emploi de 2 bogies disposés comme l'indique la figure 486, chacun avec 2 moteurs de 25 chev., permet, en effet, d'atteindre une puissance totale de 100 chev., bien suffisante sur la voie de 1 m.; cette puissance peut être doublée sur la voie normale par l'emploi de moteurs de 50 chev.

On peut, d'ailleurs, grâce à l'emploi de la double réduction, augmenter notablement les dimensions transversales à la voie et la puissance des moteurs en reportant les engrenages à l'*extérieur* des roues, comme le montre la figure 493 (p. 48), au lieu de les

placer à l'intérieur comme à l'ordinaire (et comme nous l'avons figuré sur nos croquis); sur les voitures à crémaillère de Barmen, on a pu, par ce procédé, loger des moteurs de 60 chev. parallèlement aux essieux sur une voie de 1 m. Le même dispositif est évidemment applicable aussi au matériel à adhérence pour faibles vitesses et aurait pu être adopté, par exemple, pour les automobiles de la ligne du Fayet à Chamonix.

Pour les locomotives, qui ont besoin d'une puissance plus considérable, lorsque la place dont on dispose pour loger les moteurs dans le truck ne suffit plus en raison de l'encombrement plus grand qu'occasionnent les roues de crémaillère, on devra prendre le parti de loger les moteurs au-dessus du châssis, comme on l'a fait, par exemple, pour la locomotive de la Jungfrau (fig. 502) et celle de l'Union Gesellschaft (fig. 505). On pourrait aussi tirer parti de la disposition des moteurs à arbre parallèle à la voie signalée plus haut (fig. 469), en leur faisant attaquer le faux essieu portant la roue dentée.

2° *Matériel à action mixte.* — Le matériel à action mixte semble, malgré la classification, plus facile à réaliser que le matériel simple, parce qu'il demande moins de place pour loger les roues de crémaillère.

Deux modes de construction différents peuvent être employés, selon qu'on adopte une crémaillère arasée au niveau des rails ou une crémaillère surélevée suivant l'usage ordinaire.

Dans le premier cas, on peut donner à la roue de crémaillère un cercle primitif égal au rayon de roulement des roues porteuses[1]; il suffit alors d'adopter le dispositif de la figure 484, en clavetant la roue dentée sur l'essieu de façon à les rendre solidaires. On pourrait aussi rendre cette solidarisation facultative en l'opérant par un embrayage, de préférence un embrayage magnétique de Bovet, facile à manœuvrer sans arrêter la voiture; mais cette combinaison ne présenterait pas d'utilité dans le cas considéré.

Une seconde solution également commode, un peu moins

[1] En pratique, on préfère, comme sur les locomotives à vapeur, prendre pour la crémaillère un rayon plus faible de quelques millimètres, de façon que le glissement des roues porteuses sur les rails, qui est la conséquence d'une inégalité de diamètre, reste toujours positif (pour soulager la crémaillère), même après usure des bandages.

simple, mais plus ramassée encore, consiste à actionner directement les essieux par les moteurs comme dans la traction par adhérence, et à coupler avec eux par chaînes ou mieux par bielles une ou deux roues dentées. Cette disposition, qui est générale et pourrait s'adapter en particulier au truck à transmission par engrenages coniques de la figure 469 pour permettre de réaliser une grande puissance avec le nombre minimum de moteurs,

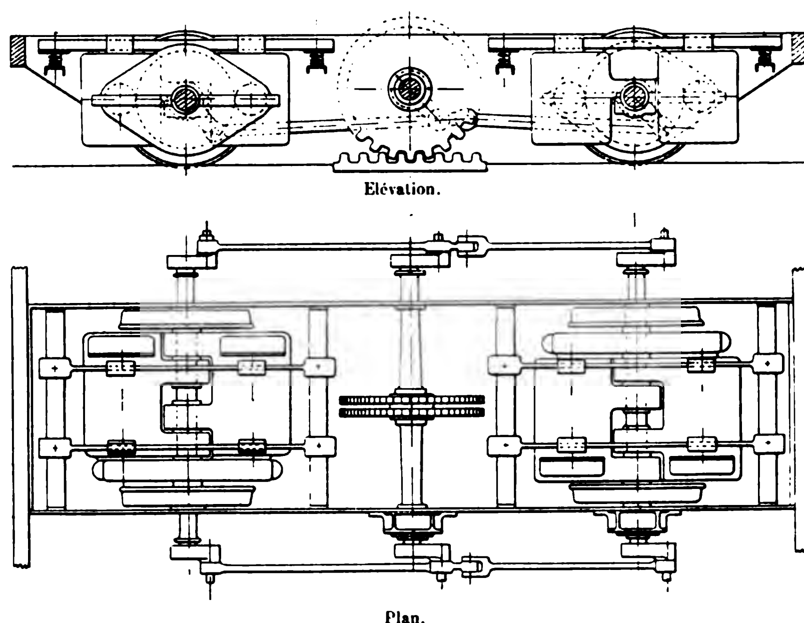


Fig. 487. — Truck à deux moteurs à action mixte avec simple réduction et transmission par bielles.

s'applique également bien au cas où la crémaillère est surélevée, à la seule condition de relever de la même quantité le faux essieu qui porte la roue dentée. La figure 487 en représente le schéma. On remarquera que, grâce à la disposition spéciale et dissymétrique des paliers des moteurs, on peut en placer deux sur chaque essieu, tournant en sens inverse et couplés en série ; on réalise ainsi à la fois une grande puissance et une faible vitesse.

Cette solution est excellente ; elle permet d'employer le matériel ordinaire de tramway à simple réduction, avec moteurs couplés constamment en série par deux pour réduire leur vitesse. Grâce à

la crémaillère, on n'a pas à craindre le patinage qu'occasionne souvent ce mode de couplage avec les bogies à simple adhérence, comme nous le disons au chapitre XIII.

3° *Matériel pour lignes à crémaillère et à adhérence.* — Jusqu'ici nous ne nous sommes occupés que du matériel circulant exclusivement sur crémaillère. Pour les lignes où l'on doit passer alternativement de la marche à adhérence sous une certaine vitesse à la marche en crémaillère sous une vitesse moindre, les dispositifs mixtes que nous venons de décrire en dernier lieu offrent la meilleure solution, puisqu'ils permettent de faire passer la vitesse normale du simple au double sans toucher au mécanisme.

Ces systèmes, lorsqu'ils s'appliquent à deux moteurs seulement, ne permettent pas de régler la vitesse ni les démarrages aussi économiquement sur les parties en crémaillère que sur les parties à adhérence, parce qu'il faut alors recourir au réglage par rhéostat, faute de pouvoir changer le couplage ; mais, au fond, cela a peu d'inconvénients, car d'une part on doit construire la voie de façon que les démarrages aient lieu en palier et d'autre part on n'a pas à modifier la régulation en rampe si les moteurs sont bien construits, car ils se règlent alors automatiquement de façon à uniformiser le travail (voir chap. IX). Il est donc assez inutile de chercher d'autres solutions comportant des dispositions mécaniques plus complexes.

Nous en signalerons cependant une assez simple qui s'appliquerait aux dispositifs des figures 481, 484 et 486. Elle consisterait à ajouter à chaque moteur une seconde transmission, non figurée, à simple réduction, attaquant l'essieu lui-même, et à disposer des embrayages magnétiques permettant de mettre le pignon du moteur à volonté en prise avec l'une ou l'autre de ces deux transmissions. Mais ces embrayages sont assez encombrants et l'on trouverait difficilement la place pour les loger ; il ne semble donc pas que cette solution puisse lutter avec la précédente. Dans les locomotives où l'on place le moteur sur le châssis, on a l'espace nécessaire pour toutes les combinaisons de transmission possibles ; mais il faut toujours réduire la complication au minimum et chercher à se rapprocher des types précédents. La locomotive de la Jungfrau, par exemple, donnerait un bon matériel de traction

mixte si l'on faisait simplement les roues dentées de même diamètre que les roues porteuses et qu'on les solidarisât par des bielles comme sur la figure 487.

4° *Matériel applicable à la crémaillère Locher.* — Dans le cas de la crémaillère Locher, comme on ne peut songer à employer des moteurs à arbre verticaux, il faut encore actionner un arbre de renvoi formé par un faux essieu horizontal; cet arbre portera une roue conique double attaquant deux autres roues d'angle à axe vertical calées sur les arbres des roues de crémaillère, comme l'indique la figure 488. Ce genre de crémaillère étant peu employé en dehors de cas très spéciaux, nous n'insisterons pas sur ces dispositions.

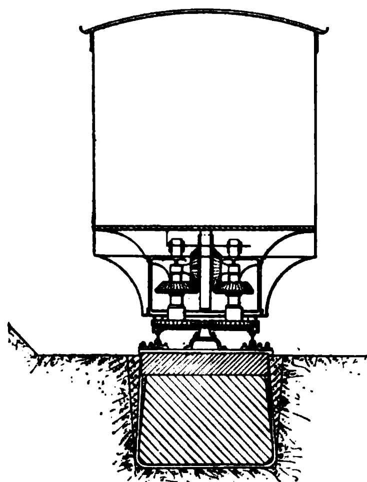


Fig. 488. — Mécanisme de commande du pignon denté applicable à la crémaillère Locher.

En définitive, on voit que les moteurs électriques permettent de réaliser des mécanismes très simples pour les automobiles et locomotives à crémaillère et se prêtent avec une extrême facilité à la solution de tous les problèmes que comporte l'emploi de la crémaillère, notamment de la traction mixte.

On aurait donc bien tort de reculer devant l'emploi de la crémaillère partout où elle paraîtra avantageuse au point de vue financier.

Exemples d'application. — Parmi les applications existantes de la traction électrique par crémaillère nous citerons en premier lieu le *tramway de Barmen*, intéressant parce qu'il est établi en partie sur chaussée ordinaire.

Cette ligne, construite par la maison *Siemens et Halske*, a été ouverte à l'exploitation en 1894. Son plan et son profil en long sont donnés par les figures 489 et 490. La longueur de la ligne est de 1 630 m., la déclivité moyenne de 10 p. 100 et la déclivité maxima de 18, 5 p. 100; le rayon minimum des courbes est de 150 m. La voie a 1 m. de largeur et est double sur tout le parcours.

La figure 491 montre la disposition de cette voie en chaussée et sur plateforme séparée. La crémaillère, du système Riggenbach, règne d'un bout à l'autre de la ligne; son pas est de 75 mm., l'écartement des joues de 90 mm. et la longueur des tronçons de crémaillère de 3 m.



Fig. 489. — Plan du tramway à crémaillère de Barmen.

Dans les parties en chaussée, les rails sont du type Phœnix, et dans les parties sur plateforme séparée, du type Vignole. Les rails et la crémaillère, arasés dans un même plan, sont fixés sur des traverses métalliques espacées de 1 m. et munis de patins qui s'appuient contre ces traverses, pour parer au glissement longitudinal de la voie. Tous les 30 ou 40 m., les traverses sont ancrées sur de solides murettes en maçonnerie.

Les changements de voie à chaque extrémité de la ligne s'effectuent au moyen d'un chariot transbordeur électrique, qui se place automati-

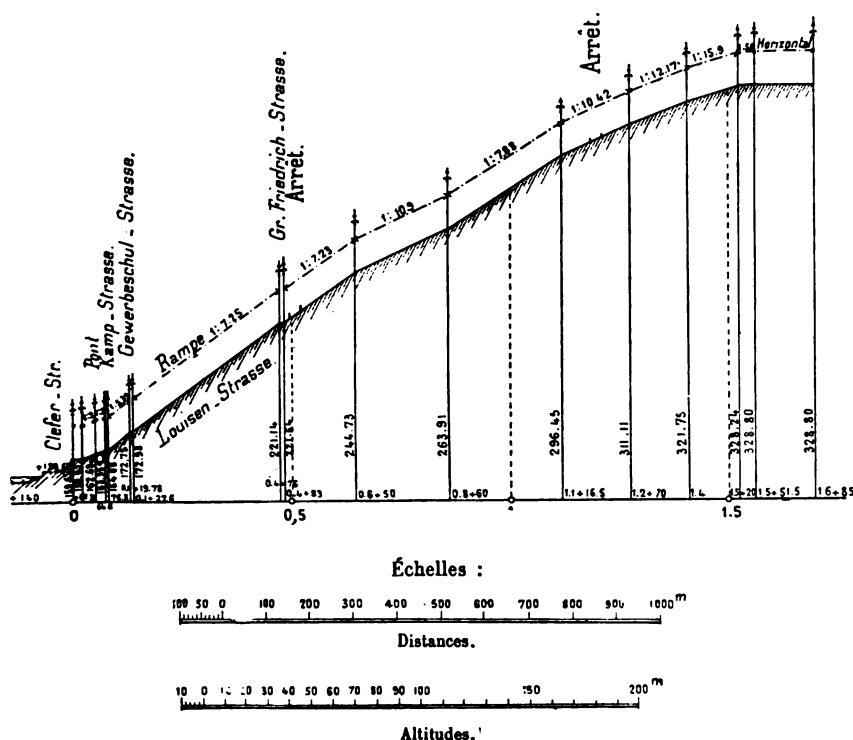


Fig. 490. — Profil en long du tramway à crémaillère de Barmen.

quement dans le prolongement de l'une ou l'autre voie, en sorte que la manœuvre ne nécessite l'intervention d'aucun agent spécial.

Les automobiles (fig. 492) ont 8 m. de longueur, dont 6,12 m. pour la caisse proprement dite, et 2,45 m. de largeur ; elles contiennent 16 places assises et 4 debout. Les essieux, au nombre de deux, portent chacun une roue dentée engrenant avec la crémaillère et sont actionnés par deux moteurs indépendants à double réduction de 60 chev., excités en dérivation (fig. 493). Chaque essieu est muni en outre de tambours cannelés sur lesquels peuvent venir s'appliquer des sabots manœuvrés au moyen d'une vis de l'une ou l'autre plate-forme. Indépendamment de ces freins, la voiture porte un frein automatique, qui agit dès que la vitesse dépasse une limite déterminée (environ 3,20 m. à la seconde) ; l'énergie nécessaire à la manœuvre de ce frein est emmagasinée dans un ressort, qui est déclanché par un régulateur à force centrifuge. En prévision du cas où les deux roues dentées viendraient à échapper simultanément à la cré-

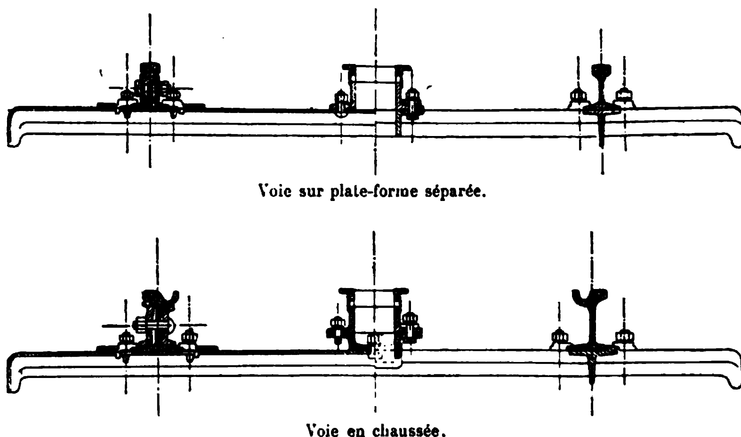


Fig. 491. — Tramway à crémaillère de Barmen. — Coupes transversales de la voie.

maillère, on a de plus muni le véhicule d'un frein de sûreté comportant des coins en fonte qui peuvent venir se placer sur le rail en avant des roues et substituer ainsi le frottement de glissement au frottement de roulement. Le mécanicien dispose enfin du freinage électrique, qui est habituellement seul employé pour régler la vitesse sur les pentes, et qui permet accessoirement de récupérer et de restituer à la ligne, sous forme d'énergie électrique, 40 à 60 p. 100 du travail développé à la descente. Le poids de la voiture est de 9 t. environ à vide.

La vitesse de marche est de 9 km. à l'heure en palier et sur les faibles rampes, et de 6, 5 km. sur les déclivités plus fortes.

Le *chemin de fer du mont Salève* (près Genève), construit par la *Compagnie de l'Industrie Electrique*, est le premier chemin de fer de montagne à crémaillère où l'électricité ait été adoptée comme agent moteur (1892-93).

Il comprend (fig. 494) deux tronçons qui partent de deux points situés au pied de Salève, Veyrier et Etrembières, et viennent se souder à Monnetier à un

troisième tronçon conduisant jusqu'aux Treize-Arbres, près du sommet de la montagne. Le développement total de la ligne est de 9,1 km. La déclivité moyenne est de 11, 9 p. 100 et la rampe maxima de 25 p. 100 (fig. 495).

La voie (fig. 496), de 1 m. de largeur, est en rails Vignole de 15,3 kg., posés sur traverses métalliques de 25 kg. espacées de 0,90 m. d'axe en axe. La crémaillère, qui règne sur tout le parcours, est du système Abt, à simple lame



Fig. 492. — Voiture à crémaillère de Barmen.

sur les rampes inférieures à 10 p. 100 et à double lame sur les rampes plus fortes.

Le courant est amené aux voitures à la tension de 500 volts par un rail latéral isolé ; son retour s'effectue par les rails et la crémaillère.

Le service est fait au moyen de voitures automobiles à 40 places, dont 32 assises, circulant isolément. La figure 497 montre la vue d'ensemble et la figure 498 les détails de construction d'une de ces voitures.

La caisse repose directement sur le châssis, sans ressorts de suspension, et

Fig. 493. — Moteur des voitures à crémaillère de Barmen.

la charge est portée par 3 essieux ayant un empattement total de 3,28 m.

Fig. 494. — Plan du chemin de fer du Salève.

L'adhérence des roues porteuses n'est pas utilisée ; les deux roues intermédiaires, ainsi que l'une des roues de chacun des essieux extrêmes, sont folles sur leur axe.

Tout l'effort de traction est supporté par deux paires de pignons dentés

calés sur des faux essieux qui sont attaqués chacun, par l'intermédiaire d'un train d'engrenages supplémentaires, par un moteur Thury à double réduction (fig. 499). Ces moteurs développent normalement 30 chev. à la vitesse de 600 tours, mais sont susceptibles d'en développer 50 pendant quelques ins-

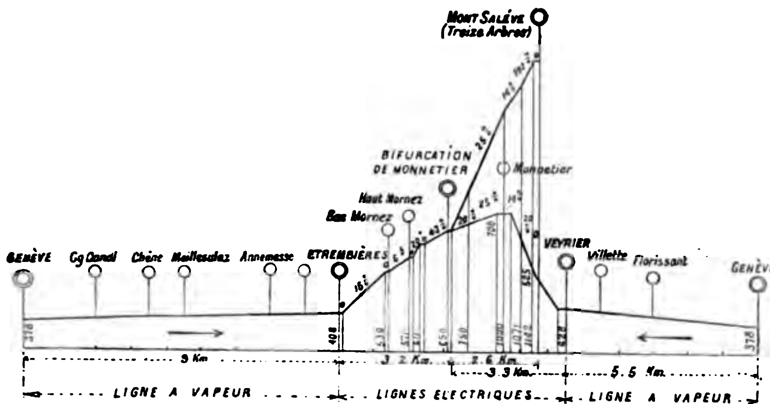


Fig. 495. — Profil en long du chemin de fer du Salève.

tants, sans échauffement exagéré, à la vitesse de 1 200 tours. La réduction totale de vitesse est de 1 : 14. Les paliers de l'arbre intermédiaire et ceux de l'arbre des pignons de crémaillère font partie du bâti du moteur, qui est porté par l'essieu du milieu et par l'un des essieux extrêmes. La transmission de mouvement comprend ainsi 6 arbres ; en y ajoutant les trois essieux, on arrive pour chaque voiture à un ensemble assez compliqué de 9 axes de rotation. Le poids des

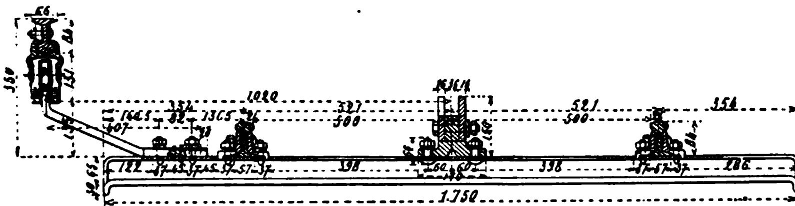


Fig. 496. — Chemin de fer du Salève. — Coupe transversale de la voie.

moteurs seuls est de 2, 6 t. ; mais, avec les transmissions et les bâtis, ce poids s'élève à 6 t., ce qui, pour la puissance totale normale de 60 chev., correspond à un poids spécifique relativement élevé de 100 kg. par cheval. La voiture complète pèse 10,4 t. à vide. Les pertes dans les moteurs et les transmissions s'élèvent à 26 p. 100.

Ce résultat est sujet à critique et aurait pu être sensiblement amélioré par l'emploi de moteurs et d'engrenages plus perfectionnés, et par le calage direct des pignons de crémaillère sur les essieux porteurs, ce qui eût en même temps paré au ferraillement désagréable du mécanisme actuel.

Indépendamment du freinage électrique, chaque voiture est munie de puis-

sants freins à vis agissant par des sabots de friction sur des tambours cannelés montés sur le prolongement de l'arbre des moteurs ; ces freins auraient donné



Fig. 497. — Automobile du Salève. — Vue d'ensemble.

plus de sécurité si on les avait appliqués directement aux arbres des pignons de crémaillère.

La vitesse des voitures varie, suivant la déclivité, de 1,50 m. à 3 m. par seconde.

Comme second exemple de matériel électrique à crémaillère pour lignes de montagne, nous signalerons celui du *chemin de fer du Gornergrat*, construit par la maison *Brown, Boveri et Cie*, de Baden.

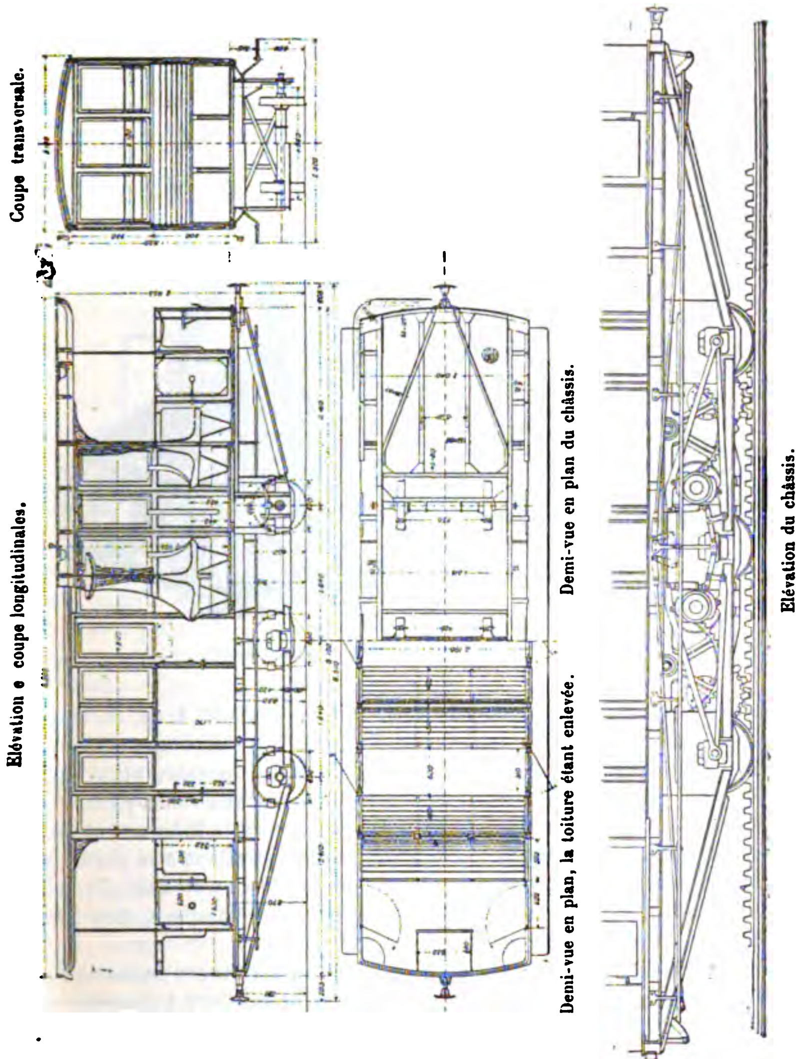


Fig. 498. — Automobile du Salève. — Détails.

La longueur de la ligne Zermatt-Gornergrat est de 9, 8 km.; la rampe la plus forte atteint 20 p. 100 et le rayon minimum descend à 80 m.; la voie, de 1 m., est munie d'une crémaillère Abt. Le matériel de traction comprend trois locomotives de 180 chev. Les trains sont formés d'une locomotive accouplée d'une façon invariable avec un wagon à voyageurs de 50 places et d'une voiture d'attelage de 60 places ; leur poids total est de 28 t. Les courants d'alimenta-

tion, courants alternatifs triphasés à 550 volts (primaires à 5 000 volts), sont distribués aux locomotives par deux conducteurs et par les rails.

Chacune des locomotives est composée d'un châssis reposant sur deux essieux et portant deux moteurs triphasés de 90 chev. chacun, du type Brown ordinaire d'atelier à inducteur fixe et induit tournant. Ces moteurs actionnent chacun, par un double train d'engrenages, une roue dentée du système Abt, calée sur un arbre spécial. Au-dessus d'eux sont placés les rhéostats de mise en marche et de régulation de vitesse. La vitesse normale est de 6 km : h. Ces machines sont très analogues à celles de la Jungfrau que nous décrivons ci-après avec plus de détails.

Nous citerons encore, bien qu'elle soit restée à l'état de projet, une locomo-

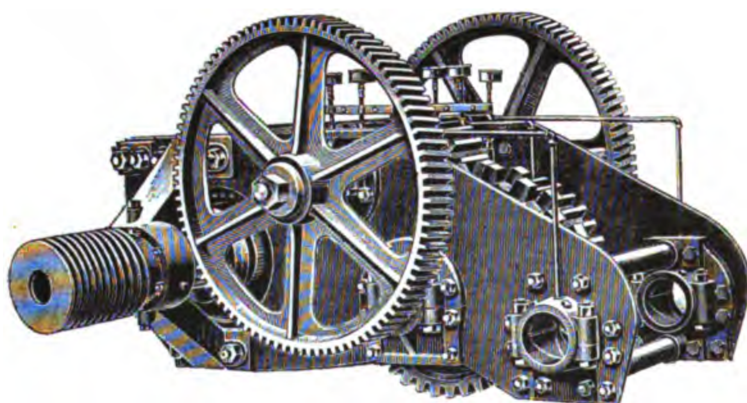


Fig. 499. — Moteur des automobiles du Salève.

tive fort originale qui avait été étudiée par la compagnie P.-L.-M. en vue de la traction par adhérence et par crémaillère sur la *ligne du Fayet à la frontière suisse par Chamonix* [1]. Elle ne devait avoir qu'un moteur, placé sur le châssis et dont l'induit aurait transmis son mouvement aux roues par l'intermédiaire de bielles et de balanciers pour la traction par adhérence simple ; les inducteurs, mobiles eux aussi autour de l'induit, devaient être portés par des bouts d'arbre creux commandant de même par bielles et balanciers des roues dentées du système Abt pour la traction par crémaillère. Les balais devaient être mobiles avec les inducteurs.

Cette machine n'ayant pas été exécutée, nous n'insisterons pas davantage sur sa description. Nous sommes d'ailleurs absolument opposés à l'emploi sur une locomotive de grande puissance d'un seul moteur et à fortiori à la commande de deux systèmes de roues différents par le même moteur ; ce dispositif, motivé, dans le cas présent, par le désir de réduire le poids de la locomotive autant que possible, offre l'inconvénient grave d'exposer la machine à rester en détresse en cas d'avarie au moteur unique ; de plus, la solution de l'inducteur tournant, si ingénieuse qu'elle soit, exige des paliers tour-

[1] Voir pour les détails du projet le rapport de M. Auvert cité plus haut (t. I, p. 426).

nants et des balais mobiles, toutes dispositions condamnées par la pratique [1].

Une autre application des plus intéressantes de la traction électrique par crémaillère est le *chemin de fer de la Jungfrau*, dont l'audacieuse et persévérante initiative appartient à M. *Guyer-Zeller*, qui en est aussi le concessionnaire.

Le tracé (fig. 500 et 501) part de la station de Scheidegg, sur le chemin de fer de la Wengernalp, à une altitude de 2 064 m., pour aboutir, en passant par l'Eiger et le Mönch, à un point situé à 4 093 m. d'altitude, d'où les voyageurs atteindront le sommet de la Jungfrau (4 166 m.) au moyen d'un ascenseur vertical. La longueur totale de la ligne sera de 12,3 km., dont 10,4 km. en tunnel [2]; la rampe maxima est de 25 p. 100 et le rayon minimum des courbes de 100 m. La voie a 1 m. d'écartement.

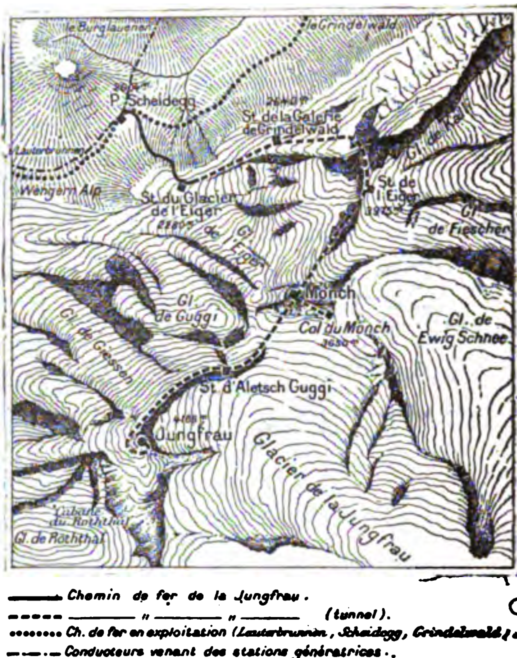


Fig. 500. — Plan du chemin de fer de la Jungfrau.

L'exploitation se fera par crémaillère; chaque train se composera de deux wagons, pouvant contenir ensemble 70 personnes assises environ, et d'une locomotive électrique, placée toujours à l'extrémité inférieure du train et couplée d'une façon permanente et rigide avec la voiture adjacente. Cette liaison a pour but d'empêcher l'essieu le plus élevé de la locomotive de se soulever en cas d'arrêt brusque; la voiture peut d'ailleurs se dételer facilement pour la commodité des réparations; elle n'a pas de freins, ceux de la locomotive suffisant; les trépidations ne s'y font pas sentir et l'assemblage est articulé de façon à rendre aisé le passage en courbe.

La locomotive (fig. 502) repose par l'intermédiaire de ressorts spiraux assez raides (10 mm. de jeu seulement) sur deux essieux à roues de 0,60 m. Le châssis, en tôle et fers profilés, porte deux moteurs triphasés de 125 chev., tournant à 800 tours, qui actionnent chacun par deux trains d'engrenages à

[1] Tous les essais de balais mobiles effectués à notre connaissance, même sur des dynamos fixes, ont conduit à de mauvais résultats, à cause de la difficulté d'en régler convenablement la pression.

[2] Le tracé est presque entièrement en tunnel, pour préserver la voie contre l'envahissement des neiges et les avalanches; cette disposition permet en outre d'éviter les pentes anormales, qui augmenteraient outre mesure les frais d'exploitation.

double réduction symétriques un arbre sur lequel est calé un pignon de crémaillère de 0,70 m. de diamètre. Les rhéostats sont placés au-dessus des moteurs.

Fig. 501. — Profil en long du chemin de fer de la Jungfrau.

La machine porte trois sortes de freins :

1° Sur l'arbre des moteurs, un frein à lame à commande électrique, combiné avec le régulateur de façon que le courant se trouve interrompu et les leviers serrés dès que la vitesse dépasse une certaine limite; ce frein est aussi commandé au moyen d'une corde régnant d'un bout à l'autre du train;

2° Un frein à main comportant des sabots qui viennent frotter sur des tambours montés sur l'arbre des pignons de crémaillère;

3° Enfin, un frein à mâchoires embrassant l'un des rails et pouvant être actionné soit par le mécanicien, soit par le conducteur.

Le poids total de cette locomotive est de 13 t. Elle est alimentée à 500 volts par des courants triphasés secondaires (lignes primaires à 7 000 volts) et peut développer normalement un effort de traction de 6 600 kg. La vitesse maxima prévue est de 8 km. à l'heure sur les rampes supérieures à 15 p. 100 et de 8,5 km. sur les déclivités plus faibles. Le trajet se fera en trois heures et demie.

La dépense totale est estimée à 10 millions de francs, soit 780 000 fr. par km., y compris l'ascenseur. Il est à souhaiter que cette belle entreprise, en voie d'exécution, soit bientôt couronnée d'un complet succès.

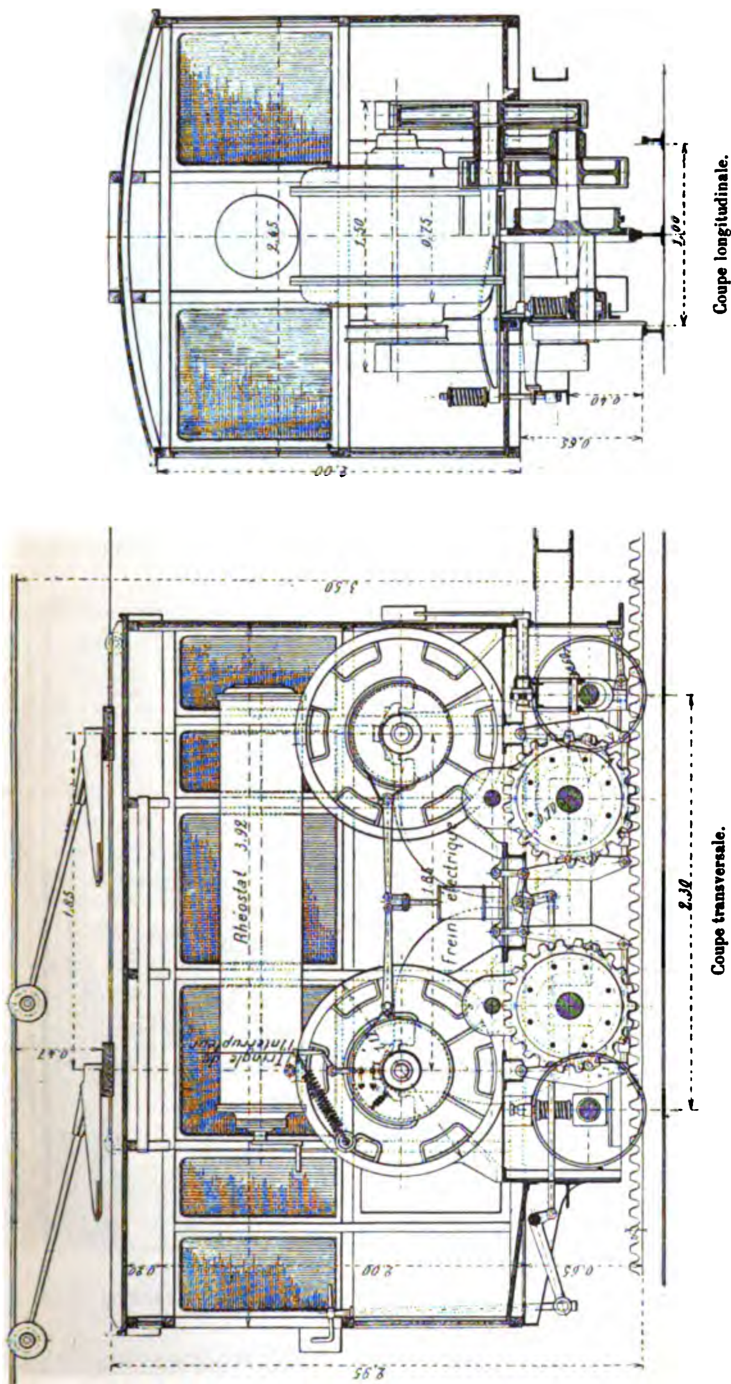


Fig. 502. — Locomotive à courants polyphasés de la Jungfrau.

Enfin, la traction électrique par crémaillère a reçu un certain nombre d'ap-

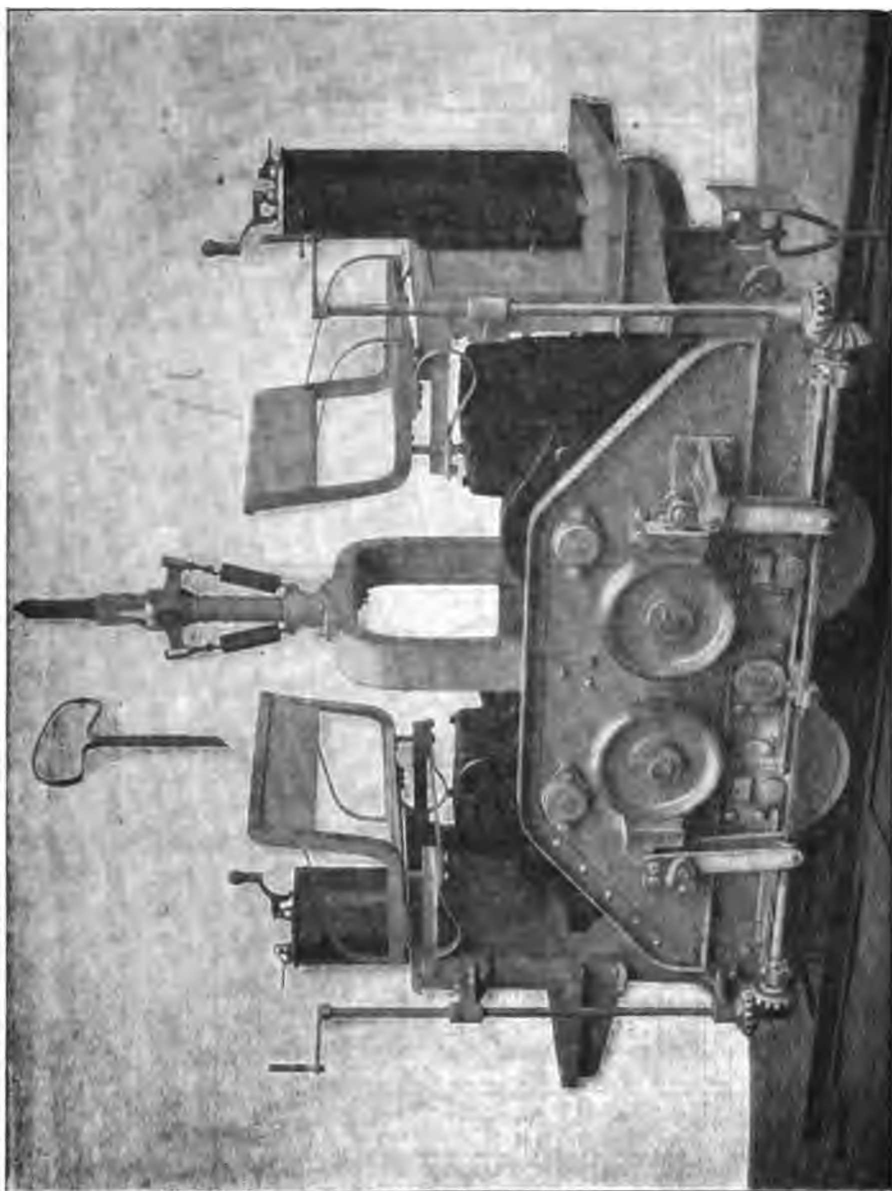


Fig. 503. — Locomotive industrielle à crémaillère de l'Union Elektricitäts Gesellschaft. — Vue d'ensemble.

plications sur des voies ferrées industrielles à pentes raides, dans les mines, etc.

Les figures 503, 504 et 505 montrent comme exemple une locomotive construite

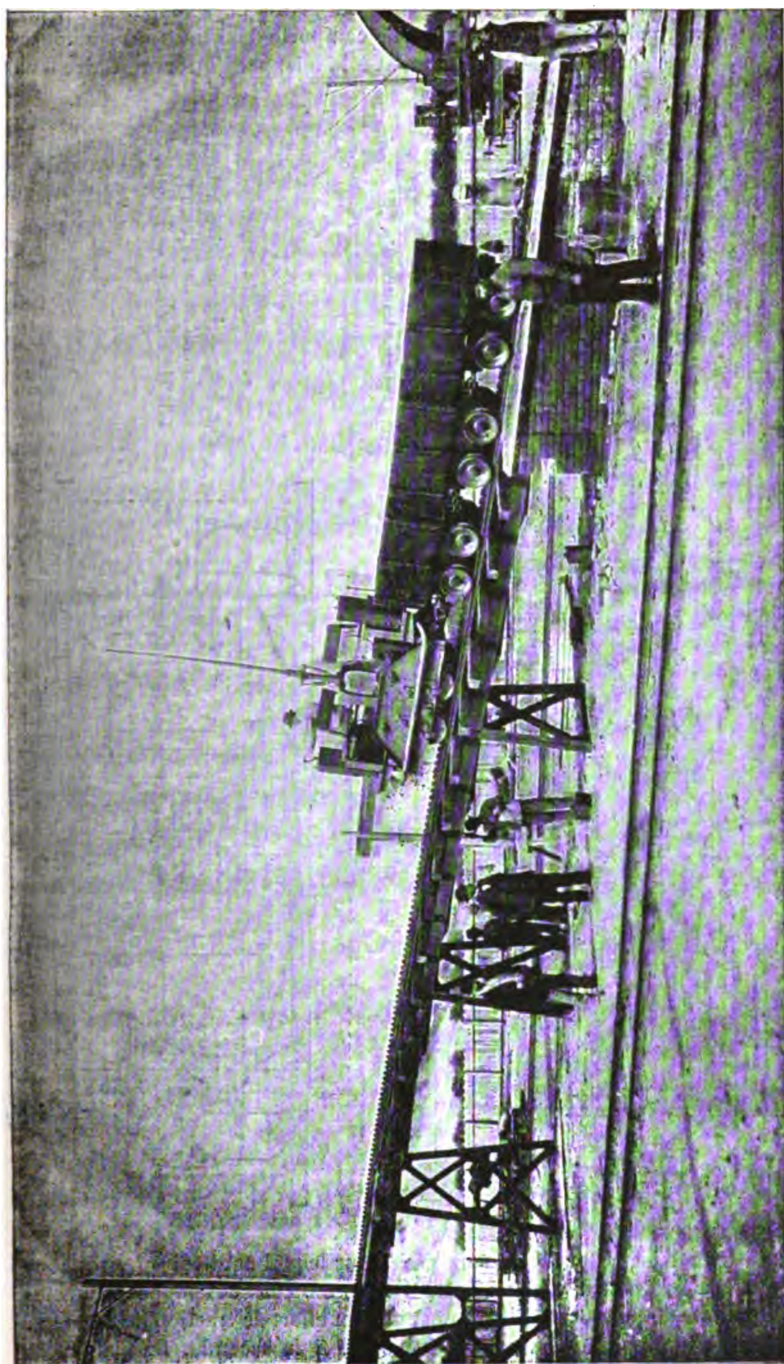


Fig. 504. — Locomotive à crémaillère de l'U. E. G. remorquant des wagonnets de minerai à l'usine de Salgó-Tarján.

par l'*Union Elektricitäts Gesellschaft* pour ce genre de service. C'est une machine mixte, pour voie de 0,635 m. ; elle comporte deux moteurs à double réduction, placés sur le châssis et attaquant à la fois, par l'intermédiaire d'un

Coupe transversale.

Elévation.

Plan.

Fig. 505. — Locomotive industrielle à crémaillère de l'Union Elektricitäts Gesellschaft. — Détails.

troisième train d'engrenages, un faux essieu sur lequel sont calés les pignons de crémaillère et les deux essieux porteurs. Ces moteurs développent normalement 35 chev. de puissance, correspondant à un effort de traction de 2 300 kg. au crochet d'attelage, à la vitesse de 0,85 m. à la seconde. En palier, la

vitesse peut atteindre 2 m : s. Le freinage s'opère au moyen de sabots qui frottent sur des tambours cannelés montés sur le prolongement des deux arbres intermédiaires. Le poids total de la machine en ordre de marche est de 3 500 kg.

Poids du matériel électrique à crémaillère. — Il est intéressant de comparer, au point de vue du poids spécifique, les matériels à crémaillère actionnés par l'électricité et par la vapeur.

Pour les locomotives à crémaillère à vapeur, on est arrivé à réduire le poids mort au minimum en augmentant la surface de grille par rapport à la capacité de la chaudière, en réduisant la longueur des tubes et en forçant le tirage; on a ainsi des machines qui utilisent mal le combustible[1], mais qui sont très légères relativement aux locomotives à adhérence.

Le tableau ci-dessous indique[2] les poids et puissance d'un certain nombre de machines à crémaillère à vapeur :

TYPE DE MACHINE	LIGNE	POIDS de la machine en ordre de marche en kg.	PUISSANCE en chevaux-vapeur effectifs.	POIDS par cheval vapeur effectif en kg.
Machines simples	Vitznau-Rigi	17 000	125	136,0
	Arth-Rigi	17 000	165	103,0
	Pilate	8 135	73	110,6
Machines mixtes	Langres	15 600	160	97,5
Machines à deux mécanismes	Blankenburg-Tanne	55 000	475	145,7
	Viège-Zermatt	29 000	245	118,3
	Lehesten-Oertelsbruch	23 200	185	125,9
	Diacophto-Kalavryta	15 600	100	156,0
	Höllenthal	42 400	310	136,3

Si l'on met en regard les quelques chiffres que nous avons donnés pour les matériels électriques à crémaillère, on voit que dans les automobiles du Salève le mécanisme moteur pèse 100 kg. par cheval effectif à la jante, soit 10 p. 100 de moins que celui des automobiles à vapeur du Pilate. Mais le matériel du Salève a un poids encore excessif et qui ne fait pas bien ressortir la supériorité des moteurs électriques; il est d'une construction déjà ancienne, et l'on

[1] D'après M. Riggenbach, les machines de son système consomment de 2 kg. à 2,5 kg. de charbon par cheval-heure.

[2] D'après l'ouvrage précédemment cité de M. Lévy-Lambert.

pourrait aujourd'hui, en employant les dispositifs indiqués plus haut, réaliser en pareil cas des appareils presque aussi légers que ceux des automobiles à adhérence. La preuve en est fournie par les automobiles de Barmen, qui pèsent à peine 9 t. à vide, avec deux moteurs de 60 chevaux ; comme l'ensemble de la caisse, du châssis et des trains de roues ne peut pas peser moins de 3,5 t., il reste 5,5 t. au plus pour le mécanisme moteur, ce qui correspond à 45 kg. environ par cheval.

De leur côté, les locomotives électriques à crémaillère de l'Union Elektricitäts Gesellschaft pèsent 100 kg. par cheval, tout compris, ce qui est relativement lourd pour des locomotives complètes. Pour les machines beaucoup plus puissantes de la Jungfrau, on a pu descendre jusqu'à 52 kg. par cheval.

On peut donc, en résumé, considérer comme des maxima les poids spécifiques de 50 kg. par cheval pour le mécanisme moteur d'une automobile à crémaillère électrique et de 100 kg. pour une locomotive complète.

Prix d'établissement d'une crémaillère. — Le prix d'établissement de la crémaillère et de ses supports varie en général, suivant le profil de la ligne et les charges à remorquer, entre 30 000 et 40 000 fr. par kilomètre, qui viennent s'ajouter aux dépenses de construction de la voie proprement dite.

Malgré cela, le coût kilométrique d'une ligne établie, même partiellement, à crémaillère est le plus souvent inférieur à celui d'une ligne à adhérence qui se développerait entre les mêmes points extrêmes, parce que les fortes rampes de la première permettent de suivre de plus près le relief du sol, en évitant les grands terrassements et les ouvrages d'art importants. Le tracé à crémaillère donne, en outre, toujours une économie de longueur.

Accessoirement, il faut tenir compte de l'augmentation de prix du matériel roulant due au mécanisme denté; mais comme la crémaillère permet de faire la traction par locomotives, le nombre des voitures équipées et des moteurs peut se trouver assez réduit pour transformer cette augmentation en une diminution.

Lorsqu'on compare, dans un cas donné, les deux solutions à

crémaillère et à adhérence [1], on trouve donc, en général, en faveur de la première, une économie sérieuse au point de vue du prix total d'établissement. Mais il faut voir aussi si cette économie ne sera pas compensée par une augmentation de frais d'exploitation, assez difficiles à évaluer actuellement en l'absence de données suffisamment nombreuses et précises sur l'exploitation électrique à crémaillère.

Il ne faut pas perdre de vue, non plus, que la vitesse, sur les sections à crémaillère, ne peut guère dépasser 10 km. à l'heure [2], ce qui, sur une ligne à voie unique, limite a priori le nombre des trains. Cette limitation, jointe à la faible capacité des convois qu'il est possible de remorquer sur les fortes rampes, réduit sensiblement la capacité de trafic des lignes à crémaillère. Toutefois, celle-ci reste encore suffisante pour répondre aux besoins ordinaires des chemins de fer de ce genre : les exemples du Höllenthal, du Harz [3], etc., montrent qu'on peut sans crainte adopter la solution de la crémaillère pour toutes les lignes de montagne qui ne sont pas des voies de grand transit.

Comparaison entre le système à crémaillère et le système à contrepoids. — On dispose, comme nous l'avons rappelé, de deux moyens pour faire franchir aux voitures électriques une rampe accidentelle qui dépasse les limites de l'adhérence, le contrepoids et la crémaillère, et il est intéressant de comparer ces deux méthodes.

Toutes deux peuvent assurer à peu près la même sécurité et la même économie d'énergie si l'on pratique la récupération avec les voitures à crémaillère comme à Barmen; mais la seconde donne une flexibilité bien plus grande pour le tracé et le profil de la ligne.

Dans le cas particulier des voies sur chaussée, la crémaillère est de beaucoup la plus simple au point de vue de la voie et elle n'entraîne que des frais supplémentaires insignifiants à côté de ceux que

[1] Il ne s'agit ici, bien entendu, que des cas où les deux systèmes sont comparables; pour des lignes comme celles du Salève, du Gornergrat ou de la Jungfrau, il n'y avait pas d'hésitation possible : elles devaient être à crémaillère ou ne pas être.

[2] Au delà de cette limite, les pignons de crémaillère risqueraient de se coincer et de dérailler; la puissance disponible sur les voitures vient d'ailleurs elle-même limiter la vitesse réalisable.

[3] Le chemin de fer du Harz a transporté, en 1890, 80 000 voyageurs et 170 000 t. de marchandises.

nécessite le système à contrepoids; mais elle risque de s'obstruer et exige un mécanisme à double effet plus compliqué et surtout plus encombrant, comme on l'a vu plus haut, que le mécanisme ordinaire. En outre, dès que les pentes sont un peu fortes, les moteurs d'une voiture, calculés en vue de la déclivité moyenne, se trouvent insuffisants pour franchir la rampe dans des conditions de rapidité et de rendement satisfaisantes. Le contrepoids les soulage de tout l'excès de travail qu'ils auraient à fournir et permet ainsi d'utiliser la voiture comme sur le reste de son parcours avec un équipement minimum. Nous croyons, par suite, qu'il faut préférer le système à contrepoids dans tous les cas où il s'agit d'une rampe exceptionnelle et isolée sur un réseau urbain, et que la crémaillère est, au contraire, préférable lorsque la ligne présente des rampes presque continuelles et que les voitures peuvent être établies rationnellement avec la puissance nécessaire sur ces rampes.

La même conclusion subsisterait dans le cas d'une ligne de chemin de fer à traction mixte : l'exemple de la ligne du mont Tom citée plus haut (t. II, p. 25) montre que le système à contrepoids est réalisable sur une ligne à voie unique d'une longueur importante (1 500 m.) et permet de réduire beaucoup la puissance des moteurs.

Il va de soi, d'ailleurs, que l'emploi de véhicules automobiles combiné avec un câble compensateur n'a de raison d'être que si les mêmes voitures sont appelées à circuler sur d'autres tronçons de ligne à simple adhérence ; dans le cas contraire, l'adoption d'un simple treuil fixe permet de supprimer tous les moteurs des voitures, en même temps que l'installation coûteuse des fils de trôlet le long de la canalisation aérienne destinée au transport de l'énergie jusqu'au sommet.

TRACTION

CHAPITRE IX

FONCTIONNEMENT DES MOTEURS DE TRACTION A COURANT CONTINU

§ 1. — Principes généraux

Généralités. — L'étude de la marche d'une automobile ou d'un train actionné par l'électricité ne peut être faite d'une manière vraiment rationnelle qu'en tenant compte des propriétés particulières aux moteurs électriques : les conditions de fonctionnement et de régulation de ceux-ci diffèrent en effet complètement de celles des moteurs mécaniques, à vapeur ou à air comprimé, employés pour le même usage, et permettent de traiter les problèmes de traction avec plus de précision et de rigueur. En outre, il est, dans bien des cas, possible de remplacer l'évaluation mécanique du travail par une évaluation électrique, ce qui est plus rationnel et conduit plus directement à la connaissance de l'énergie électrique consommée.

Nous sommes ainsi amenés à étudier d'abord les propriétés pratiques des moteurs électriques considérés comme appareils de traction et leur mode de régulation ; nous examinerons ensuite les résistances à vaincre pour la propulsion des voitures et en dernier lieu la façon dont l'effort moteur intervient pour vaincre ces résistances dans les diverses circonstances de la marche d'une voiture ou d'un train. Ces quatre questions, dont les deux dernières sont connexes, feront l'objet de trois chapitres successifs ; en outre, nous avons cru nécessaire, pour éviter toute confusion, de réserver un chapitre spécial à l'exposé des propriétés et de la régulation des moteurs à courants alternatifs.

Production de l'effort moteur et du mouvement. — L'invention du moteur électrique à courant continu date de l'expérience de la réversibilité des dynamos que nous avons rappelée dans l'Historique ; en vertu de cette réversibilité, la dynamo, qui produit de l'énergie électrique lorsqu'on lui applique du travail mécanique, peut inversement produire du travail mécanique lorsqu'on l'alimente en énergie électrique.

Les phénomènes dont un moteur à courant continu est le siège peuvent se ramener à quatre principaux : la création des champs magnétiques, la production de l'effort moteur, l'intervention d'une force contre-électromotrice et enfin la réaction d'induit. Nous les rappellerons en quelques mots pour ceux de nos lecteurs qui ne connaissent bien la dynamo que comme génératrice.

1° *Champs magnétiques.* — Soit, par exemple, le moteur à quatre pôles dont deux conséquents, type très employé pour la traction, représenté en coupe schématique par la figure 506. Pour la simplicité de l'exposé, nous supposerons le noyau d'armature lisse et recouvert d'une seule couche de fils conducteurs.

Chacune des deux bobines inductrices B_1 et B_2 produit un *flux magnétique*, qui suit le chemin indiqué par les lignes d'induction tracées en pointillé; chaque flux se divise en deux circuits qui viennent se fermer par la carcasse, l'un à droite, l'autre à gauche du noyau ; les deux flux apparaissent dans l'entrefer sous forme de lignes de force, dont la densité, presque constante sous les pôles, diminue très vite au voisinage des cornes et s'annule dans les plans à 45° indiqués par les lignes en traits mixtes. Le sens des lignes de force[1] est déterminé par celui de l'enroulement et du courant dans les bobines B_1 et B_2; celles-ci doivent être disposées de façon à déterminer deux flux opposés, donnant lieu, par exemple, à deux pôles nord verticaux N,N et à deux pôles sud horizontaux S,S.

2° *Effort moteur.* — L'armature est formée d'un noyau de fer doux traversé par les flux inducteurs et garni le long de l'entrefer de fils conducteurs parcourus par le courant électrique[2]; celui-ci arrive, au moyen de fils non représentés, par les deux balais b_1 et b_2. Quel que soit le mode de bobinage adopté (voir au chap. V) et sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans le détail des connexions avec le collecteur, cet organe a pour effet de partager le courant total en deux moitiés et d'envoyer l'une avec un même sens dans tous les fils situés sous les pôles N,N et l'autre avec le sens opposé dans tous les fils situés sous les pôles S,S.

Cette répartition des courants est représentée schématiquement sur la figure 506, où les cercles noirs indiquent les fils dans lesquels le courant va d'avant en arrière et les cercles blancs ceux dans lesquels le courant va d'arrière en avant. L'enroulement se trouve ainsi divisé en quatre quadrants égaux[3], et, grâce au collecteur, *cette répartition se reproduit identique dans l'espace pour toutes les positions de l'armature.*

[1] Ce sens se détermine aisément par la règle du tire-bouchon de Maxwell : le flux est dirigé suivant le sens du mouvement longitudinal d'un tire-bouchon qu'on ferait tourner dans le même sens de rotation que le courant dans la bobine magnétisante.

[2] S'il s'agit d'un enroulement en anneau, les parties de spires autres que celles que nous représentons ne concourent pas à la production de l'effort moteur.

[3] En réalité, ils ne le sont pas tout à fait, car on a vu au chapitre V que le nombre

En vertu des lois de l'électromagnétisme, tout conducteur rectiligne de longueur l, parcouru par un courant i et placé dans un champ magnétique d'intensité $\mathcal{H}$, est soumis à une force proportionnelle aux trois facteurs $\mathcal{H}, l, i$ et perpendiculaire à la fois au conducteur et à la direction des lignes de force[1]. Les fils représentés autour du noyau sont donc tous soumis à des forces de ce genre, perpendiculaires à l'axe et qui tendent à faire tourner l'armature autour de celui-ci; par suite de la symétrie, les composantes radiales s'annulent deux à deux et il ne reste que les composantes tangentielles, égales deux à deux; les courants étant de sens contraire sous les pôles de nom contraire, toutes ces forces sollicitent l'armature dans le même sens et ont pour résultante un *couple* de rotation autour de l'axe.

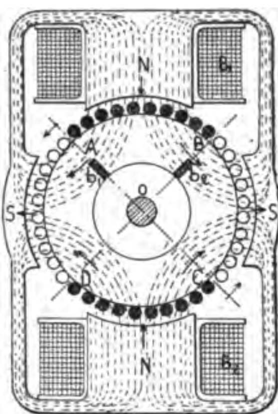


Fig. 506. — Coupe schématique d'un moteur à courant continu (type à pôles conséquents).

3° *Force contre-électromotrice.* — Lorsque le couple moteur ainsi produit dépasse le couple résistant appliqué à l'arbre, le moteur se met à tourner avec une vitesse croissante. Dans ce mouvement, chacun des fils traversant les champs magnétiques devient, en vertu de la loi générale de l'induction, le siège d'une force électromotrice induite e proportionnelle au flux coupé à chaque instant $\left(e = -\frac{d\Phi}{dt}\right)$. Tous les fils situés sous un même pôle ont des f. é. m. de même sens et qui s'ajoutent en vertu du mode de bobinage; l'effet du collecteur est, par une opération inverse de celle que nous avons indiquée pour le courant, d'additionner en série les f. é. m. qui prennent naissance sous les deux pôles opposés et en parallèle chacune des deux séries ainsi formées. Il apparaît, en définitive, aux balais une f. é. m. résultante E, sensiblement constante[2] comme la répartition des fils et égale à la demi-somme des valeurs absolues de toutes les f. é. m. élémentaires. On démontre aisément qu'elle a

des fils, au lieu d'être un multiple de 4 comme nous le supposons ici, doit être augmenté ou réduit de 1.

[1] Si l'on mesure tout en unités *c.g.s.*, y compris le courant, la force est $\mathcal{H}li$ dynes $= \frac{\mathcal{H}li}{981}$ grammes.

Pratiquement, il est plus facile de se rappeler qu'un conducteur de 1 m. de longueur, traversé par un courant de 1 ampère dans un champ de 1 weber par m^2 (10 000 c.g.s.), est soumis à un effort de $\frac{1}{9,81}$ kilogramme (9,81 étant le rapport connu du kilogrammètre au joule). Quant au sens de la force, on l'obtient en se rappelant qu'un observateur couché le long du fil, recevant le courant par les pieds et regardant suivant la direction des lignes de force magnétiques, tendrait à se déplacer vers sa gauche.

[2] En négligeant la petite perturbation due au passage de chaque section sous les balais.

pour valeur $Nn\Phi$, en appelant N le nombre total des fils périphériques, Φ la somme des flux inducteurs et n le nombre de tours par seconde.

En vertu de la loi de Lenz, cette f. é. m. est opposée à celle du réseau d'alimentation; c'est pourquoi on l'appelle *force contre-électromotrice* induite du moteur.

Elle intervient d'une façon essentielle dans le fonctionnement; c'est d'elle, en particulier, que dépend l'intensité du courant qui traverse le moteur, beaucoup plus que de sa résistance intérieure r. Tandis qu'un récepteur ordinaire, une lampe par exemple, de même résistance et alimentée au même potentiel U, serait parcourue par un courant

$$I = \frac{U}{r},$$

le moteur ne laissera passer qu'un courant

$$I = \frac{U - E}{r}.$$

La force électromotrice E allant en croissant avec la vitesse, on voit le courant diminuer lorsqu'un moteur, partant du repos, active peu à peu son allure; en marche normale, E atteint aisément au moins 90 p. 100 de U.

4° *Réaction d'induit.* — L'armature parcourue par un courant se comporte comme un électro-aimant et donne lieu, elle aussi, à un champ magnétique, qui se superpose au champ inducteur et le déforme. Dans les moteurs industriels ordinaires, cette réaction magnétique force à décaler les balais d'un certain angle en arrière par rapport au sens du mouvement, ce qui provoque une réduction de la f. é. m. induite; dans les moteurs de traction à champ puissant et munis de balais en charbon, calés invariablement à la ligne neutre, les effets de la réaction, sans être nuls comme on pourrait le croire, sont réduits; nous en tiendrons compte, du reste, indirectement à l'aide de formules empiriques.

En pratique, comme on l'a vu (chap. V), les conducteurs de l'armature sont logés dans des dentures et la théorie devrait être exposée différemment; les phénomènes restent cependant équivalents à ceux que nous avons indiqués dans le cas d'un induit à noyau lisse; la principale différence, c'est que les forces électromagnétiques se trouvent appliquées non plus sensiblement aux conducteurs eux-mêmes, mais presque entièrement aux dents de fer qui les séparent[1]; les conducteurs échappent ainsi aux actions mécaniques destructives, sans cesser de remplir leur rôle utile.

Puissance et rendement. — La puissance mécanique recueillie sur l'arbre d'un moteur est égale à la puissance électromagnétique développée par la réaction des courants de l'armature sur le champ magnétique inducteur, moins les pertes d'énergie p dues aux frottements, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans l'arma-

[1] Cf. Mordey, « On dynamos », *Inst. of El. Eng.*, mai 1897.

ture ; la puissance électrique dépensée est égale, d'autre part, à la puissance développée, plus l'énergie ϖ consommée par effet Joule dans l'induit et les inducteurs et qui est fournie directement par le réseau.

Le *rendement* a donc pour expression [1]

$$\eta = \frac{Ei_a - p}{Ei_a + \varpi}, \qquad (11)$$

qu'on peut écrire aussi, en appelant i le courant total consommé,

$$\eta = \frac{Ui - p - \varpi}{Ui}.$$

Pratiquement, le numérateur se détermine non par le calcul, mais par l'expérience, en mesurant au frein de Prony le couple C_u développé sur l'arbre et le multipliant par $2\pi n$, n étant le nombre de tours par seconde. D'où

$$\eta = \frac{2\pi\, n\, C_u}{Ui}. \qquad (11\ bis)$$

Si l'on désire englober les pertes de la transmission dans les frottements, on mesurera le couple moteur sur l'essieu au lieu de le déterminer sur l'arbre du moteur [2].

Dans les expressions précédentes, les puissances doivent être exprimées en watts et les couples en joules. Si l'on mesure, comme on le fait généralement, ces derniers en kilogrammètres, il faudra multiplier le second membre de l'expression (11 *bis*) par 9,81.

Bien que nous supposions le lecteur déjà au courant des propriétés usuelles des moteurs électriques, nous croyons nécessaire de rappeler sous une forme pratique et directement adaptée à la traction les principes généraux sur lesquels elles reposent.

[1] Nous ne considérons ici que le vrai rendement, c'est-à-dire le rendement industriel. On a donné autrefois le nom de « rendement électrique » au rapport

$$\eta = \frac{Ei_a}{Ui}.$$

C'est là, pour nous, une notion non seulement inutile, mais nuisible, qui devrait être rayée, comme un véritable anachronisme, des traités et manuels où la routine l'a fait conserver trop longtemps.

[2] Il est très nécessaire, lorsqu'on compare des rendements, de savoir dans laquelle des deux conditions ci-dessus ils ont été mesurés; on distinguera donc avec soin le *rendement sur l'arbre moteur* et le *rendement à la jante des roues*.

Couple et vitesse. — Les deux éléments essentiels qui caractérisent le fonctionnement d'un moteur de traction sont le couple et la vitesse angulaire, dont le produit représente la puissance utile. Pour savoir régler la marche des moteurs, il est donc nécessaire de connaître d'une manière bien nette les facteurs dont dépendent ces éléments dans les conditions ordinaires d'emploi.

1° *Facteurs dont dépend la vitesse.* — Considérons un moteur tournant à une vitesse quelconque et soit E la force électromotrice induite dans l'armature par la rotation. La force électromotrice théorique opposée à la tension du réseau d'alimentation est proportionnelle, comme on le sait, au nombre total N de fils répartis sur la périphérie extérieure de l'induit, à la vitesse n de celui-ci et à la somme Φ des flux magnétiques issus des pôles inducteurs de même signe. Soit Φ_0 la valeur qu'auraient ces flux sans la réaction magnétique de l'induit, qui produit une f. é. m. correctrice ε; on a à toutes charges :

$$E = Nn\Phi = Nn\Phi_0 - \varepsilon, \tag{12}$$

Φ étant exprimé en unités pratiques ou webers[1], n en nombre de tours *par seconde*, E et ε en volts. Cette expression s'applique aux machines bipolaires ou multipolaires à induit bobiné en série.

A tout régime, cette force électromotrice doit se trouver égale à la différence de potentiel entre balais U, diminuée de la chute de potentiel due à la résistance r_a du circuit d'armature parcouru par le courant d'armature i_a. On a donc l'égalité

$$E = U - r_a i_a. \tag{13}$$

La vitesse que doit prendre l'armature pour réaliser cette f. é. m. est ainsi, en vertu de l'équation (12),

$$n = \frac{U - r_a i_a + \varepsilon}{N\Phi_0}. \tag{14}$$

A flux inducteur et courant égaux, la vitesse d'un moteur ne dépend donc que de la différence de potentiel entre balais.

[1] Nous appelons *weber* un flux égal à 10^8 c. g. s. La considération de cette unité supprime les facteurs 10^8 et 10^7 qu'il faudrait sans cela ajouter respectivement aux expressions de la f. é. m. et du couple, et permet d'obtenir ce dernier directement en joules.

La nécessité d'avoir un bon rendement fait, en général, que la chute de potentiel intérieure $r_a\, i_a$ ne dépasse pas, au régime maximum, une très petite fraction de la tension aux balais U. La réaction magnétique ε, qui est de signe contraire, est également très petite, parce que les balais sont toujours calés à la ligne neutre. On peut donc souvent se contenter comme *approximation pratique*, dans un service d'exploitation, de la relation simple

$$n = \frac{U}{N\,\Phi_0}. \qquad (14\ bis)$$

D'où cette règle que *la vitesse est sensiblement proportionnelle à la différence de potentiel appliquée aux balais et inversement proportionnelle au flux magnétique inducteur.*

2° *Facteurs qui déterminent la valeur du couple.* — La puissance électrique utilisée dans l'armature pour la génération de l'effort moteur est le produit de la force électromotrice qui y est induite par le courant qui la traverse,

$$P_e = E i_a = (U - r_a\, i_a)\, i_a. \qquad (15)$$

S'il n'y avait pas de pertes d'énergie, cette puissance se retrouverait tout entière dans la puissance mécanique fournie sur l'arbre du moteur, et le couple aurait, par suite, pour expression le rapport de cette puissance à l'angle décrit pendant une seconde,

$$C_e = \frac{E\, i_a}{2\,\pi\, n} \qquad (16)$$

ou, en remplaçant E par sa valeur (12),

$$C_e = \frac{1}{2\pi}\, N\, i_a\, \Phi. \qquad (17)$$

Mais, par suite des pertes par frottements, courants de Foucault et hystérésis, il faut réduire cette expression proportionnellement au rendement η, de sorte que le couple réellement utilisable est seulement

$$C_u = \frac{\eta}{2\pi}\, N\, i_a\, \Phi.$$

Dans cette expression, i_a étant exprimé en ampères et Φ en

webers, le couple se trouve mesuré en *joules* ou watts-secondes. Un joule étant égal à $\frac{1}{9,81}$ kgm., le couple a pour valeur en *kilogrammètres*

$$C_u = \frac{1}{9,81}\frac{\eta}{2\pi} N i_a \Phi.$$

Si, pour simplifier, on néglige les variations de η et de Φ aux différents régimes, on peut formuler cette seconde règle *approximative* que, dans les limites ordinaires de régime, *le couple est sensiblement proportionnel au courant et au flux inducteur.*

Cette règle est presque toujours suffisante pour la pratique de la traction. Mais il est souvent intéressant et utile de connaître avec plus de précision la loi de variation. On y arrive aisément de la manière suivante :

Soient $2q$ le nombre de pôles du moteur, n le nombre de tours par seconde, A un coefficient de perte par frottements, V le volume du fer induit, $\mathcal{B}$ l'induction maxima à laquelle il est soumis, γ et δ deux coefficients. On peut écrire pour la perte d'énergie occasionnée par les frottements, l'hystérésis et les courants de Foucault l'expression connue de la puissance perdue

$$p = \underset{\text{Frottements}}{An} + \underset{\text{Hystérésis}}{\gamma q V \mathcal{B}^{1,6} n} + \underset{\text{Courants de Foucault}}{\delta q^2 V \mathcal{B}^2 n^2} \qquad (18)$$

ou, ce qui revient au même, en choisissant convenablement deux coefficients B et D,

$$p = (A + B\Phi^{1,6})n + D\Phi^2 n^2.$$

En tenant compte des pertes p, l'expression vraie du couple peut s'écrire sous la forme

$$C_u = \frac{Ei_a - p}{2\pi n}. \qquad (19)$$

En y substituant p, on obtient l'équation rigoureuse

$$C_u = \frac{1}{2\pi}\left[N\Phi i_a - (A + B\Phi^{1,6}) - D\Phi^2 n\right]. \qquad (20)$$

On voit ainsi qu'à intensité et excitation égales le couple diminue un peu quand la vitesse augmente par l'effet du troisième terme; mais celui-ci est, en général, presque insignifiant, grâce à l'emploi de tôles très minces pour la construction du noyau de l'induit. Il en résulte que le couple en marche ne diffère pas sensiblement de celui qu'on obtient avec même flux et même intensité de courant dans le moteur immobile ($n = 0$), et qu'on peut le déterminer expérimentalement sans faire tourner le moteur.

La formule (19) peut se mettre sous une autre forme, souvent plus commode : en désignant par i_0 le courant consommé pour compenser les pertes d'énergie p, c'est-à-dire en posant $p = Ei_0$,

on a, en effet,

$$C_u = \frac{E\,(i_a - i_o)}{2\pi n} = \frac{N\Phi}{2\pi}\,(i_a - i_o). \qquad (21)$$

C'est cette expression que nous emploierons de préférence, et on verra plus loin que pour les moteurs ordinaires en série, on peut y supposer Φ constant.

Les formules (14) et (20) ou (21) définissent les conditions de fonctionnement d'un moteur quelconque et serviront de base à toutes les considérations suivantes.

Les éléments caractéristiques du fonctionnement d'une voiture actionnée par un moteur électrique s'en déduisent par des coefficients de proportionnalité qui varient avec le diamètre des roues et le coefficient de réduction des engrenages.

Soient en effet :

C, le couple sur l'arbre du moteur en kilogrammètres,

F, l'effort de traction à la jante des roues de la voiture en kilogrammes,

d, le diamètre des roues en mètres,

$\frac{1}{m}$, le coefficient de réduction, c'est-à-dire, dans le cas d'une transmission par engrenages simples, le rapport du nombre de dents du pignon à celui de la roue d'engrenages,

n', le nombre de tours de l'induit par minute[1],

V, la vitesse en kilomètres à l'heure,

P' la puissance à la jante en watts.

On a les relations de proportionnalité :

$$V = \frac{60\,n' \times \pi\,d}{1\,000} = 0{,}1885\,n'd, \qquad (22)$$

$$F = \frac{C}{\frac{d}{2}}\,m = \frac{2\,m\,C}{d}, \qquad (23)$$

$$P = 9{,}81\,\frac{FV}{3{,}6} = 2{,}725\ FV. \qquad (24)$$

Suivant les cas, on rapporte les courbes de fonctionnement d'un moteur de traction aux variables C et n' ou F et V ; les premières, ne dépendant que du moteur, sont les plus rationnelles pour un

[1] Nous prenons ici le nombre de tours par minute n' pour nous conformer aux usages ; dans les formules précédentes nous avons considéré, au contraire, le nombre de tours par seconde, parce que la seconde est la base du système d'unités électriques et dispense d'introduire partout un facteur parasite 60.

constructeur; les secondes sont les plus pratiques pour l'étude de l'exploitation à l'aide d'un matériel donné.

Dans ce qui suit, nous donnerons comme exemples indifféremment les unes ou les autres.

Courbes caractéristiques. — Il est extrêmement commode de représenter les propriétés des moteurs électriques par des courbes résultant soit de calculs, soit d'expériences directes sur chaque moteur.

On trace ordinairement des caractéristiques *électro-mécaniques* représentant, pour chaque valeur du courant qui traverse l'induit, la vitesse du moteur et son couple effectif ou la vitesse de la voiture ou de l'induit et l'effort de traction à la jante des roues[1].

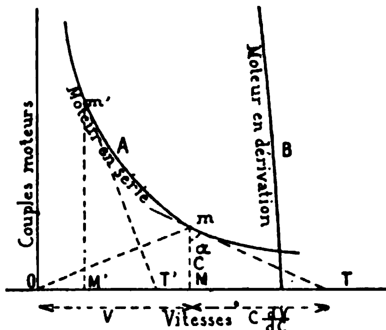


Fig. 507. — Principe des courbes caractéristiques rapportées aux seuls éléments mécaniques.

Des mêmes résultats on peut déduire une caractéristique purement *mécanique* en éliminant le courant et en rapportant directement les couples aux vitesses (fig. 507). On pourrait rapporter également à celles-ci les intensités de courant, mais on préfère, en général, faire l'inverse.

La caractéristique mécanique suffit à définir au point de vue de la traction un moteur quelconque, et rien ne distingue à cet égard les moteurs électriques des autres. Les caractéristiques électromécaniques (fig. 517, p. 86) présentent en plus deux avantages : elles indiquent les consommations de courant et permettent d'apprécier les risques d'échauffement des enroulements. Elles jouent pour les moteurs électriques le même rôle que les diagrammes de vitesse et de couple à admission constante pour les machines à vapeur; mais elles sont un peu moins claires que les caractéristiques mécaniques, puisqu'il faut lire deux courbes au

[1] L'intensité du courant prise comme variable commune est souvent portée en ordonnée ; il semble plus commode, étant données les habitudes françaises, de la porter en abscisse.

lieu d'une pour voir la vitesse qu'on peut atteindre avec un couple donné, c'est-à-dire sur une rampe donnée.

On peut également, comme le montre, par exemple, la figure 536, représenter par des courbes les variations des puissances électrique et mécanique, définies ci-dessus, et du rendement qui en est le rapport. On trace généralement ces dernières courbes sur la même épure que les précédentes.

Stabilité de marche. — Pour que la marche d'un moteur soit stable, il faut, suivant les conditions ordinaires de l'équilibre, que tout écart de régime fasse naître une action opposée à celle qui l'a produit; il faut donc, si l'on suppose l'effort de traction indépendant de la vitesse, que le couple moteur aille en diminuant quand la vitesse augmente et inversement. Plus la variation de couple produite par une variation de vitesse donnée sera grande, plus le régime sera stable.

Graphiquement, cette règle se traduit par la condition que la courbe des couples en fonction des vitesses présente une chute rapide dans le sens des vitesses croissantes. Si l'on trace sur la figure 507 en un point m la tangente mT, le coefficient angulaire de cette droite est

$$\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{dC}{dV}.$$

La stabilité est donnée par ce rapport

$$\frac{dC}{dV} = \frac{\overline{Mm}}{\overline{MT}}.$$

On voit ainsi que la stabilité de marche est plus faible pour la courbe A que pour la courbe B et qu'elle est plus grande en m' qu'en m.

Les remarques précédentes suffisent pour permettre de prévoir toutes les circonstances du fonctionnement des moteurs. Celles-ci sont différentes suivant le mode d'alimentation et suivant le genre d'excitation des inducteurs.

Le seul mode d'alimentation en usage sur les lignes existantes est l'alimentation à potentiel constant; nous pouvons donc laisser de côté pour le moment les autres systèmes, en nous réservant d'en dire quelques mots plus loin. Quant au mode d'excitation,

il est nécessaire d'en montrer l'influence en passant en revue les propriétés des diverses combinaisons. Nous supposerons, pour comparer celles-ci, qu'on ne modifie ni la tension d'alimentation, ni le mode de groupement des bobines, ni les résistances des circuits.

§ 2. — Propriétés des moteurs suivant leur mode d'excitation

Modes d'excitation des inducteurs. — On sait que les moteurs

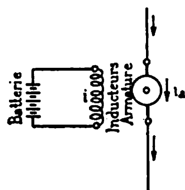


Fig. 508. — Excitation par batterie.

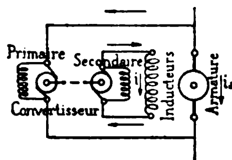


Fig. 509. — Excitation par convertisseur tournant.

Fig. 508 et 509. — Schémas d'excitation indépendante.

à courant continu peuvent être excités de trois façons différentes, suivant que les bobines qui produisent l'aimantation des inducteurs sont parcourues par un courant permanent provenant d'une source indépendante (fig. 508 et 509), par une *dérivation* prise aux bornes de l'induit (fig. 510) ou enfin par le courant principal lui-même (fig. 511) lorsqu'on place ces bobines *en série* avec l'induit. Ces trois modes d'excitation, qui peuvent être combinés, donnent aux moteurs des propriétés différentes, qui sont susceptibles de jouer un rôle particulièrement important dans la traction et que nous allons, pour ce motif, examiner successivement avec quelques détails à ce point de vue spécial[1].

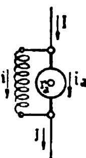


Fig. 510. Excitation en dérivation ou « shunt ».

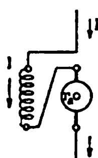


Fig. 511. Excitation en série.

Moteur à excitation constante. — Le premier cas est celui d'un moteur excité séparément par un courant invariable. On peut le réaliser en alimentant le circuit des inducteurs par une batterie

[1] On verra plus loin d'autres combinaisons plus complexes, telles que l'excitation compound.

d'accumulateurs (fig. 508) ou par un petit convertisseur (fig. 509) formé d'une dynamo secondaire actionnée par un moteur primaire qui reçoit le courant de la ligne.

Les propriétés du moteur à excitation constante sont des plus simples et se déduisent immédiatement des règles précédentes.

1° La *vitesse* du moteur ne peut dépasser d'elle-même un certain maximum, qu'elle atteint théoriquement lorsque la force contre-électromotrice induite devient égale à la tension appliquée aux balais ; le courant est alors nul. Cette vitesse maxima théorique a pour valeur

$$\nu = \frac{U}{N\Phi_0}.$$

Pratiquement, par suite des pertes d'énergie qui se produisent dans le moteur et des frottements, le couple s'annule avant le courant pour une vitesse $n_0 < \nu$.

Lorsque par suite d'une cause quelconque, par exemple par l'effet d'une pente, la vitesse prend une valeur supérieure à cette limite, la force électromotrice l'emporte sur la tension extérieure et le courant, changeant de sens, se déverse du moteur dans le réseau ; le moteur se comporte alors comme une génératrice et *joue le rôle de frein*, tout en récupérant, sous forme d'énergie électrique, le travail mécanique qu'il absorbe.

Au contraire, lorsque la vitesse est inférieure à la limite considérée, il emprunte au réseau un courant d'autant plus intense que l'allure est plus lente et celle-ci se règle d'elle-même à la valeur juste suffisante pour la production de l'effort nécessaire. On en calcule aisément les faibles variations par la formule (14), où le flux Φ_0 est constant et qu'on peut écrire aussi sous la forme

$$n = \nu\left(1 - \frac{r_a i_a - \varepsilon}{U}\right). \qquad (25)$$

Si l'on ne connaît pas le flux Φ, ni par suite la vitesse théorique ν, il est facile de mesurer le courant i_0 consommé par le moteur tournant à vide avec ses engrenages et la vitesse correspondante n_0 ; on a alors la vitesse n par le rapport

$$\frac{n}{n_0} = \frac{U - r_a i_a + \varepsilon}{U - r_a i_0 + \varepsilon_0}. \qquad (26)$$

La résistance intérieure de l'armature r_a et la réaction magnétique ε étant très faibles, la force électromotrice variera très peu entre le régime de l'effort minimum et celui de l'effort normal ; *la vitesse restera donc sensiblement constante* quel que soit le couple de traction demandé au moteur.

Cette auto-régulation de vitesse constitue la propriété caractéristique de l'excitation constante.

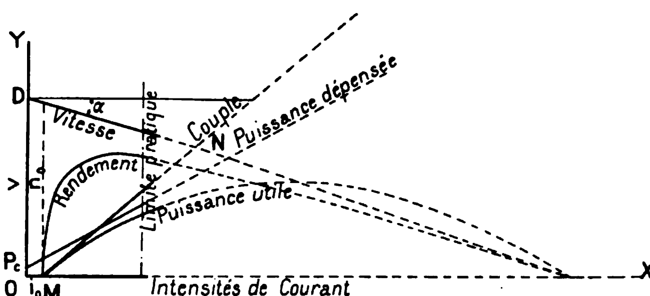


Fig. 512. — Caractéristiques d'un moteur à excitation constante en fonction du courant. — Allure théorique générale.

2° Le flux excitateur restant constant, le *couple* sera sensiblement proportionnel au courant total et suivant la formule (21) exactement proportionnel au courant utile. Ce dernier étant maximum au démarrage et allant en décroissant jusqu'à zéro pour la vitesse limite n_0, il en sera de même du couple.

Ces lois de variation sont mises plus complètement en évidence par les courbes caractéristiques dont nous allons étudier la forme théoriquement et pratiquement.

a) Traçons d'abord celles qui sont *rapportées aux intensités de courant* (fig. 512).

Pour représenter la loi des vitesses, si l'on néglige la réaction d'induit, il suffit de porter en ordonnée à l'origine OD une vitesse ν correspondant à la vitesse à vide théorique, puis de tracer une droite DN faisant au-dessous de l'horizontale du point D un angle α tel que

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_a \nu}{U}.$$

En effet, pour une valeur quelconque du courant, la figure donne

$$n = \nu - \frac{r_a \nu i}{U},$$

conformément à l'équation (25), si l'on y fait $\varepsilon = 0$.

En fait, la réaction magnétique ε relèvera la courbe de vitesse de façon à la rendre à peu près horizontale à partir d'une certaine charge (fig. 513).

D'autre part, on remarque immédiatement d'après la formule (19) que le couple est simplement proportionnel à l'intensité du courant[1], déduction faite du couple de pertes correspondant aux frottements et autres effets parasites. Celui-ci étant sensiblement constant avec l'excitation, la loi de variation du couple est représentée par une droite MN, dont l'abscisse à l'origine représente le courant perdu i_0.

La puissance électrique dépensée aux bornes du moteur croît proportionnellement au courant à condition d'ajouter une constante représentant la puissance dépensée pour l'excitation P_c ; elle sera donc représentée par une droite passant un peu au-dessus de l'origine

$$P_e = Ui_a + P_c. \tag{27}$$

La puissance motrice sur l'arbre a pour expression, en fonction du courant, l'énergie produite par le courant utile $(i_a - i_o)$ opposé à la force électromotrice induite $(U - r_a i_a)$, c'est-à-dire

$$P_u = (U - r_a i_a)(i_a - i_o). \tag{28}$$

Elle suit donc une loi parabolique présentant des valeurs croissantes avec le courant[2].

Le rendement, qui est le rapport de ces deux puissances, s'exprime en fonction du courant par le rapport

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} = \frac{U - r_a i_a}{Ui_a + P_c}(i_a - i_0). \tag{29}$$

Il croît à partir de zéro, lorsque le courant croît à partir de la

[1] Cette loi, aujourd'hui banale, du moteur à excitation constante, mais qui présentait un grand intérêt au moment de sa découverte, lorsqu'on ne savait encore rien sur les moteurs électriques, est due à M. Marcel Deprez.

[2] La puissance maxima, correspondant au sommet de la parabole, c'est-à-dire au courant $\frac{U}{2r_a} + \frac{i_o}{2}$, n'est, en effet, jamais atteinte dans les limites de fonctionnement permises par l'échauffement. La considération de ce maximum, qu'on rencontre dans un grand nombre de traités, est donc généralement illusoire et sans intérêt pratique.

valeur i_0 ; il présente un maximum pour une certaine valeur du courant i_a qui, dans un moteur bien construit, doit correspondre à peu près au régime normal ; puis, il décroît lentement lorsqu'on dépasse ce régime.

La figure 513, qui donne un exemple numérique de courbes relatives à un moteur de tramway à excitation constante de 20

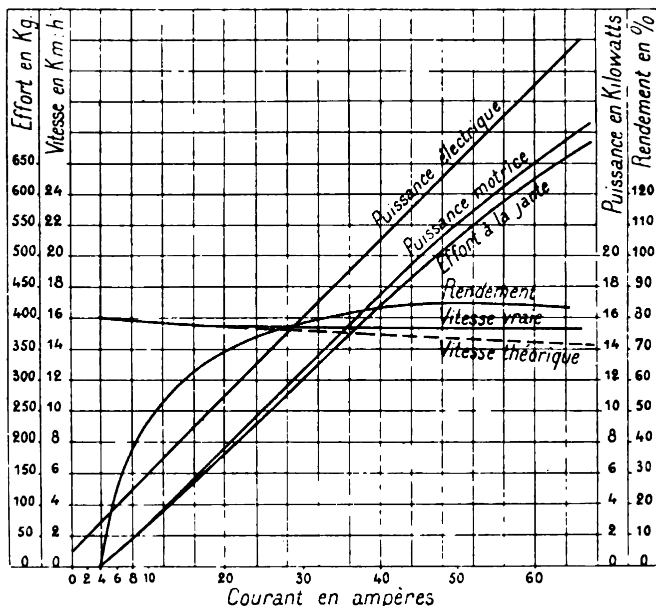


Fig. 513. — Caractéristiques d'un moteur à excitation constante en fonction du courant Exemple numérique : moteur de tramway de 20 kilowatts.

kilowatts, montre bien la forme des variations de ces divers éléments en fonction du courant, dans les limites pratiques de marche fixées par l'échauffement.

La résistance moyenne de l'induit est de 0,70 ohm. Au moyen de cette valeur, nous avons tracé au-dessous de la courbe réelle de vitesse une droite en trait pointillé qui représente la courbe calculée sans réaction magnétique d'induit. On voit que l'erreur commise est assez faible dans les limites de fonctionnement pour qu'on puisse ordinairement négliger cette réaction ; c'est ce que nous ferons dans toute la suite.

b) Les lois de variation *en fonction de la vitesse n* elle-même se

déduisent aisément des résultats précédents. Tout d'abord, le courant est donné linéairement par la relation

$$i_a = \frac{U - Nn\Phi}{r_a}; \tag{30}$$

le couple s'en déduit à l'aide de la formule (21), qui donne

$$C = \frac{N\Phi}{2\pi}\left(\frac{U}{r_a} - i_0\right) - \frac{N^2\Phi^2}{2\pi r_a} n. \tag{31}$$

Cette expression, également linéaire en fonction de la vitesse, peut s'écrire aussi, en négligeant les variations de Φ,

$$C = \frac{U}{2\pi n_0}\left(\frac{U}{r_a} - i_0\right) - \frac{U^2}{2\pi r_a n_0^2} n. \tag{32}$$

La caractéristique mécanique du moteur, c'est-à-dire la courbe qui représente la variation du couple en fonction de la vitesse, sera donc sensiblement une droite ab[1] (fig. 514). Par suite de la grande valeur qu'a toujours en pratique le coefficient de n dans l'équation (31), cette droite est presque verticale; on voit que la marche d'une voiture alimentée dans ces conditions sera extrêmement stable. Si l'on représente le courant sur la même épure, également en fonction de la vitesse, on voit aisément que l'on obtiendra une seconde droite AB encore moins inclinée; la vitesse v qui rend nul le courant est la limite de vitesse théorique, tandis que n_0 est la limite pratique. Le segment $M_0 v$ représente le courant i_0 ab-

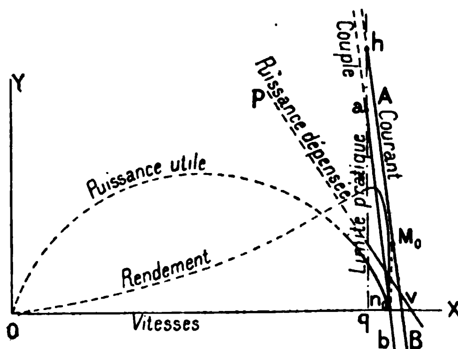


Fig. 514. — Caractéristiques d'un moteur à excitation constante en fonction de la vitesse. — Allure théorique générale.

[1] La faible réaction d'induit résiduelle pourra modifier un peu cette forme, en réduisant un peu le couple aux fortes charges, mais on peut ici négliger cet effet.

sorbé par le moteur pour tourner à vide, c'est-à-dire sans produire aucun travail utile [1].

La puissance dépensée aux balais est proportionnelle au courant d'armature; en y joignant la puissance constante P_c dépensée pour produire l'excitation des inducteurs, on a la puissance électrique totale consommée aux bornes

$$P_e = Ui_a + P_c = \left(\frac{U^2}{r_a} + P_c\right) - \frac{UN\Phi}{r_a} n. \tag{33}$$

On voit, en négligeant les variations de Φ, que cette puissance varie en fonction de la vitesse suivant une loi linéaire.

La puissance recueillie est égale au produit du couple utile par la vitesse

$$P_u = 2\pi n C_u = N\Phi \left(\frac{U}{r_a} - i_0\right) n - \frac{N^2\Phi^2}{r_a} n^2 ; \tag{34}$$

elle suit donc une loi parabolique en fonction de la vitesse [2].

Le rendement est le rapport des deux puissances

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} .$$

Il croît à partir de zéro, lorsque la vitesse diminue à partir de la valeur n_0, et atteint son maximum pour la vitesse

$$n = \frac{U^2 + r_a P_c}{U - N\Phi} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{U(U - r_a i_0)}{U^2 + r_a P_c}}\right),$$

qui diffère toujours peu de n_0 ; il décroît ensuite avec la vitesse, quand on augmente davantage la charge.

Les tracés graphiques de la figure 515, qui ont été déduits par simple transformation des courbes de la figure 513, font ressortir ces lois de variation des divers éléments en fonction de la vitesse pour le même moteur de tramway.

Par le fait même de l'auto-régulation de vitesse du moteur à

[1] Les pertes dues aux causes énumérées plus haut étant sensiblement constantes comme le flux Φ, il en est de même du courant i_0.

[2] Le maximum, qui aurait lieu pour une vitesse égale à $\frac{v}{2}$, c'est-à-dire à la moitié de la vitesse à vide, est, comme nous l'avons dit plus haut, irréalisable en pratique parce qu'un faible ralentissement qn_0 (fig. 514) suffit à donner au moteur l'intensité limite qh qu'il puisse supporter sans être brûlé par échauffement exagéré de l'induit.

excitation constante, les courbes construites en fonction des variations de la vitesse seraient, comme on le voit, très peu lisibles si l'on ne prenait la précaution de limiter l'échelle des vitesses à un faible écart.

Moteur en dérivation alimenté à potentiel constant. — Sup-

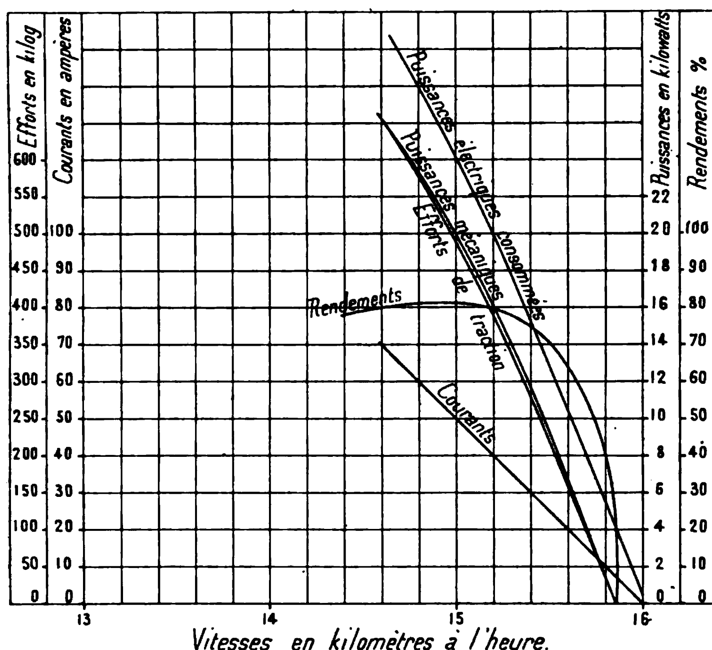


Fig. 515. — Caractéristiques d'un moteur à excitation constante en fonction de la vitesse. — Exemple numérique : même moteur que sur la figure 513.

posons maintenant le circuit inducteur alimenté, non plus par une source séparée, mais par une faible dérivation prise aux bornes de l'induit, ce qu'on obtient en constituant l'enroulement des inducteurs en fil très fin et présentant un grand nombre de spires. Par le fait même que l'excitation du moteur a lieu à potentiel constant, par hypothèse, elle est elle-même théoriquement constante, et par suite le moteur se comporte comme le précédent et présente les mêmes avantages. Nous n'avons donc pas besoin de répéter l'énoncé de ses propriétés. Les formules restent aussi les mêmes, et, pour avoir le courant total absorbé par le moteur, il suffit

d'ajouter au courant d'armature i_a le courant d'excitation constante i, pris dans ce cas à la même source.

Il y a cependant une différence importante à signaler, c'est que la constance du flux inducteur n'est pas toujours aussi assurée en pratique que dans le cas de l'excitation indépendante ; on peut bien supposer en effet la tension moyenne de la ligne constante, mais, *en fait*, si cette ligne est assez résistante et qu'il se produise en un point une demande de courant exagérée, le voltage local en ce point pourra s'abaisser au-dessous de la valeur prévue et le courant excitateur se trouvera réduit dans la même proportion. Ce fait se produirait par exemple si, au démarrage d'une voiture, on lançait le courant sans autre précaution dans les moteurs ; la résistance r_a des induits étant très faible, il se produirait dans ceux-ci un courant intense, mais il n'y aurait plus pour ainsi dire aucune différence de potentiel entre les balais auxquels sont reliés les circuits inducteurs ; on n'aurait donc plus de couple[1]. On évite cette difficulté en intercalant en série avec l'induit (fig. 516), entre les bornes auxquelles aboutissent les inducteurs, une résistance suffisante pour que le courant ne dépasse pas le triple ou le quadruple de sa valeur normale. Si, dans ces conditions, il y avait encore à craindre une chute de voltage sur la ligne, on pourrait renforcer l'excitation en dérivation par quelques spires en série sur le circuit principal (p. 104) ou par un changement de résistance du circuit d'excitation.

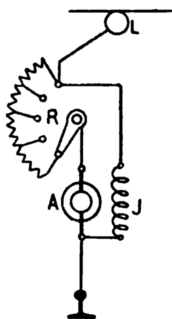


Fig. 516. — Emploi d'un rhéostat pour le démarrage d'un moteur excité en dérivation.

Une autre propriété spéciale au moteur en dérivation, lorsque ses inducteurs ne sont pas saturés, c'est que les variations de la tension du réseau affectent assez peu sa vitesse. En effet, le flux inducteur varie à peu près proportionnellement au courant d'excitation et, par suite, à la différence de potentiel aux bornes[2]. Dans l'équation (14 *bis*), le rapport $\frac{U}{\Phi}$ et par suite la vitesse n varient donc

[1] Il faut dire que cette circonstance ne peut être prise sérieusement en considération sur les tramways, car une semblable manœuvre brûlerait les moteurs et produirait une perturbation sur tout le réseau, ce qui serait plus grave encore que l'absence de couple.

[2] En admettant que les inducteurs soient assez loin de la saturation.

faiblement, comme on le verra plus loin avec détails (p. 111). Cette propriété peut offrir un certain intérêt sur les réseaux très longs, présentant une forte chute de voltage; mais le courant consommé par le moteur devra croître en raison inverse du flux inducteur pour maintenir au couple moteur sa valeur normale.

Moteur en série alimenté à potentiel constant. — Le cas de l'excitation en série diffère du précédent en ce que le flux inducteur Φ, auquel le couple est proportionnel, n'est plus constant, mais variable avec l'intensité du courant commun I. Comme la résistance des inducteurs r_i est en série avec celle de l'armature, les équations (14), (15), (21) peuvent être modifiées en remplaçant r_a par $r = (r_a + r_i)$ et en désignant par U la tension de distribution aux bornes extrêmes; Φ est une fonction trop compliquée du courant pour qu'on puisse rendre ces formules complètement explicites, mais elles suffisent pour donner une idée générale des propriétés, encore simples d'ailleurs, de ces moteurs.

Nous considérerons d'abord, pour simplifier, le cas où l'on prend le courant comme variable principale. En supposant le flux défini comme fonction de l'intensité par une courbe expérimentale

$$\Phi = f(\mathrm{I}),$$

les formules (14) et (21) deviennent les suivantes :

$$n = \frac{\mathrm{U} - r\mathrm{I} + \varepsilon}{\mathrm{N} f(\mathrm{I})}, \qquad \mathrm{C} = \frac{\mathrm{NI} f(\mathrm{I})}{2\pi} - \mathrm{C}',$$

en désignant par C′ le couple perdu par les effets parasites

$$\mathrm{C}' = \mathrm{A} + \mathrm{B} f(\mathrm{I})^{1,6} + \mathrm{D}n f(\mathrm{I})^2.$$

On en déduit les propositions suivantes :

1° Pour un enroulement inducteur donné, le flux étant fonction seulement de l'intensité du courant, on peut conclure que le *couple* ne dépend que de la valeur du courant, tout comme pour le moteur en dérivation; mais sa loi de variation en fonction du courant n'est pas la même et dépend dans une large mesure de la construction de la machine et de l'état de saturation plus ou moins grand des inducteurs.

Tout d'abord, lorsque les inducteurs ne sont pas saturés, le flux varie à peu près proportionnellement au courant, et par suite le couple presque comme le carré du courant (plus exactement, suivant une loi parabolique).

Au contraire, lorsque les inducteurs sont saturés, l'augmentation des fuites magnétiques avec le courant fait que l'accroissement de celui-ci ne modifie pas sensiblement le flux utile Φ, et le couple tend à varier à peu près proportionnellement au courant[1].

La courbe de couple est alors rapidement confondue avec une droite sensiblement parallèle à la ligne de puissance issue de l'origine, ainsi que le montre, par exemple, la figure 517. L'abscisse j_0

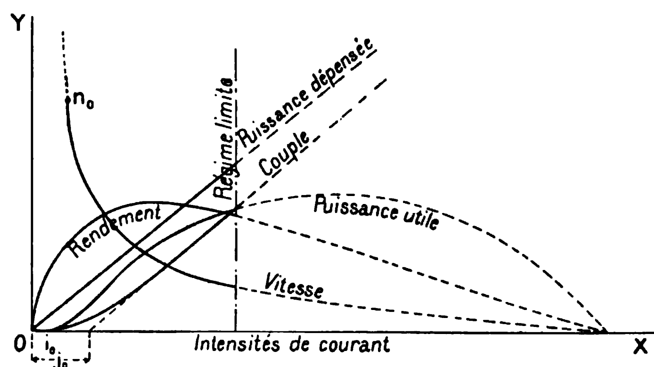


Fig. 517. — Caractéristiques d'un moteur excité en série en fonction du courant. Allure théorique générale.

à l'origine de cette droite représente le courant consommé par les pertes dues aux frottements et effets parasites, qui devient sensiblement constant à partir du commencement de la saturation.

Dans ces conditions, le moteur en série se comporte donc à peu près comme un moteur à excitation constante ayant pour résistance non plus la résistance d'armature r_a, mais la résistance totale r; les mêmes formules restent applicables dans ces limites moyennant cette correction.

Au-dessous de la saturation, nous pouvons conserver encore la

[1] Les courbes de fonctionnement que nous avons données au chapitre V confirment cette règle, qu'on peut considérer comme une *loi empirique* suffisante pour la pratique.

même forme d'équation, en désignant le courant de pertes variable par j, et écrire par conséquent d'une manière générale

$$C = \frac{N\Phi}{2\pi}\left(I - j\right); \tag{35}$$

j tend, lorsque le moteur tourne à vide, vers la valeur i_0 (abscisse à l'origine de la courbe de couple), correspondant à l'énergie minima nécessaire pour entretenir la rotation du moteur sans production d'effort utile.

2° La *vitesse* de marche ne présente plus la même constance que dans les cas précédents. Tant que les inducteurs sont saturés, tout se passe encore à peu près comme pour le moteur à excitation indépendante, bien qu'il y ait une variation notable de vitesse ; mais comme, aux faibles charges, le courant excitateur ne suffit plus à maintenir le flux constant, l'armature est obligée de tourner beaucoup plus vite pour produire la même force électromotrice, et par conséquent la vitesse s'accroît beaucoup ; de sorte qu'un moteur ayant peu de spires inductrices présente peu de stabilité d'allure et tend à s'emballer aux faibles charges. La figure 517 représente cette loi de variation du courant avec la vitesse et montre bien l'augmentation très grande de la vitesse lorsque le courant tend vers zéro ou plutôt vers le courant à vide i_0, qui n'est jamais nul.

Pour réaliser une marche plus stable et réduire les variations d'allure, il est souvent bon de saturer les inducteurs pour une faible valeur du courant, en mettant un grand nombre de spires dans l'enroulement[1]. La section du fil peut alors devenir insuffisante aux fortes charges et l'on est obligé d'y réduire la densité de courant par l'un des artifices que nous étudierons plus loin (p. 137) à propos de la régulation, c'est-à-dire soit en mettant plusieurs bobines en parallèle, soit en dérivant une partie du courant par un shunt extérieur.

La puissance consommée et la puissance utile croissent toutes deux d'une façon continue avec le courant dans les limites pratiques d'emploi, comme le montre la figure 517. La première est évidemment proportionnelle au courant du moteur I, puisque celui-

[1] L'opportunité de la saturation sera discutée plus loin (p. 92 et 102).

ci est fourni à potentiel constant et sert aussi à l'excitation ; donc

$$P = UI.$$

La seconde, en appelant encore r la résistance totale et j le

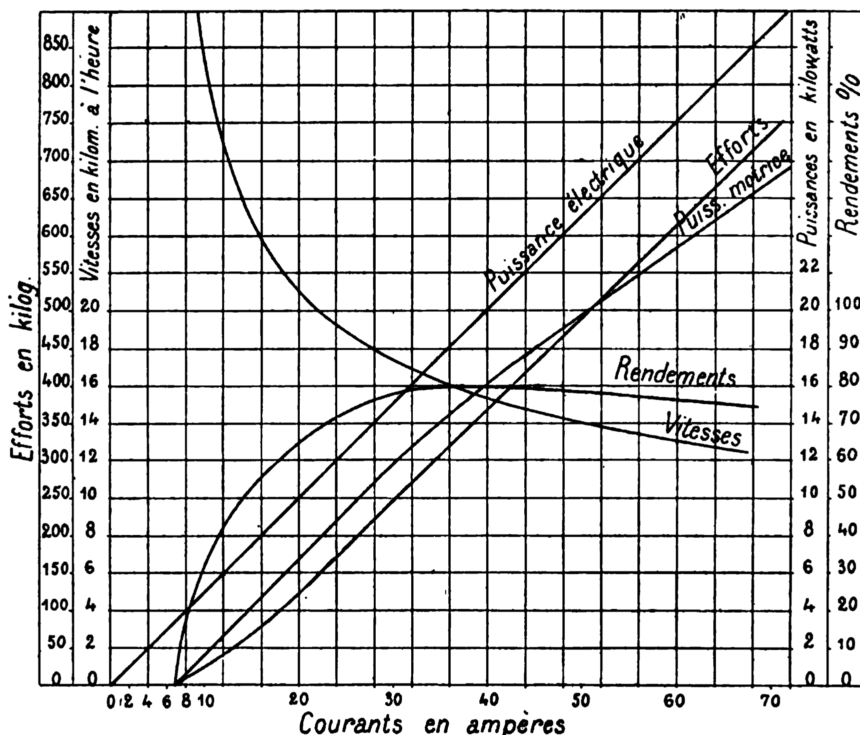


Fig. 518. — Caractéristiques d'un moteur excité en série en fonction du courant. Exemple numérique : moteur de tramway de 20 kilowatts.

courant consommé par les pertes à un régime quelconque, a pour expression

$$P_u = (U - rI)(I - j); \quad (36)$$

le courant j est compris entre les deux valeurs peu différentes j_0 et i_0 ; la puissance P_u varie donc très sensiblement suivant une loi parabolique, surtout aux fortes charges, où elle devient

$$P_u = (U - rI)(I - j_0), \quad (37)$$

comme pour le moteur à excitation constante [1].

[1] Comme pour ce moteur également, le maximum de la parabole est reporté très

Le rendement, qui est le rapport

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{U - rI}{UI}(I - j) = \left(1 - \frac{r}{U}I\right)\left(1 - \frac{j}{I}\right), \qquad (38)$$

croît à partir de la valeur zéro, réalisée lorsque le moteur tourne à vide, jusqu'à un maximum obtenu à forte charge ($j = j_0$), sous le courant

$$I = \sqrt{\frac{Uj_0}{r}},$$

et qui a sensiblement pour valeur

$$\eta_m = \left(1 - \sqrt{\frac{r}{U}j_0}\right)^2.$$

La figure 518 montre un exemple pratique de courbes relevées dans les limites d'emploi; à l'échelle près, toutes celles qu'on rencontre ont des formes peu différentes.

La variation des divers éléments s'exprime moins facilement en fonction de la vitesse qu'en fonction du courant; mais on peut l'obtenir graphiquement en transformant les courbes précédentes une fois connues, comme le montre la figure 520, déduite de la figure 518.

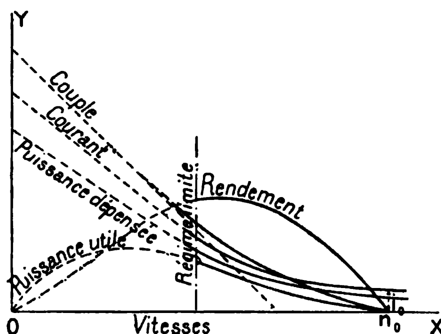


Fig. 519. — Caractéristiques d'un moteur excité en série en fonction de la vitesse. — Allure théorique générale.

La figure 519 indique plus clairement l'allure générale des courbes, supposées prolongées dans ce but en dehors des limites d'emploi.

On voit le courant croître au fur et à mesure que la vitesse diminue à partir de la vitesse limite n_0; la puissance dépensée suit la même loi; le couple croît d'abord plus vite que le courant, au-dessous de la saturation, puis ensuite proportionnellement au cou-

loin en dehors des limites de courant permises par l'échauffement, et la courbe de puissance présente, par suite, des ordonnées croissantes dans ces limites.

rant. La puissance utile croît moins vite et suivant une loi parabolique aux faibles vitesses; le maximum n'est jamais atteint, pour les mêmes raisons que plus haut[1].

Pour achever l'étude de ces variations de régime du moteur en série, nous allons indiquer la manière dont on peut les prédéterminer par le calcul, d'après la caractéristique d'excitation du

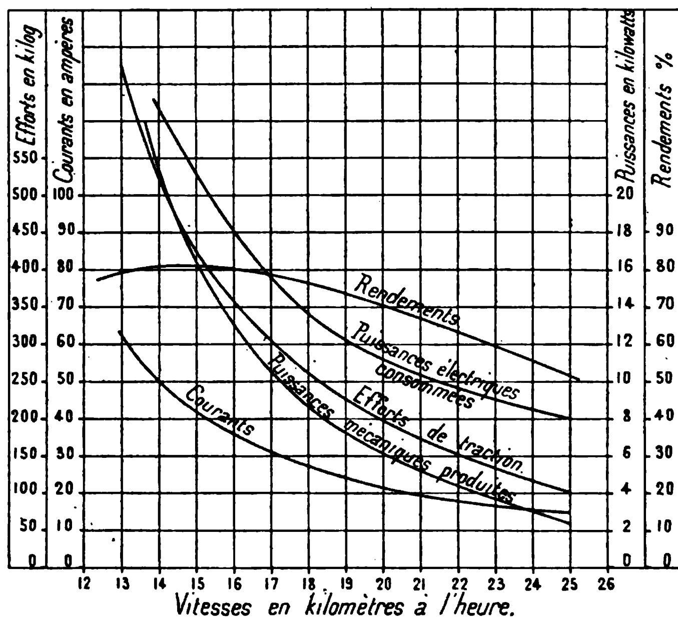


Fig. 520. — Caractéristiques d'un moteur excité en série en fonction de la vitesse. Exemple numérique : même moteur que sur la figure 518.

moteur calculée ou relevée préalablement suivant les méthodes ordinaires, et les conséquences qu'on peut en déduire au point de vue de la construction.

[1] Si l'on écrit l'expression de cette puissance sous la forme

$$P = E\left(\frac{U - E}{r} - j_o\right),$$

on voit que le maximum correspondrait à une vitesse telle que

$$E = \frac{U - rj_o}{2},$$

c'est-à-dire telle que la f.é.m. du moteur soit réduite sensiblement à la moitié de la tension du réseau ; l'échauffement ne permet pas ce régime.

Détermination des courbes de fonctionnement d'un moteur en série d'après sa courbe d'excitation (fig. 521). — Supposons qu'on ait déterminé à une certaine vitesse constante n_0 la courbe d'excitation OM, en portant en ordonnées les f. é. m. induites E et en abscisses les intensités de courant dans l'enroulement inducteur (supposé invariable). Cette épure donnera les f. é. m. correspondant aux mêmes excitations pour toute autre vitesse n, en multipliant simplement les ordonnées de la courbe OM par $\frac{n}{n_0}$.

Prenons maintenant une ordonnée OA égale au voltage d'alimentation U et traçons par le point A une droite AB faisant avec l'axe des I un angle dont le coefficient angulaire soit égal à la résistance totale R comprise entre les bornes du moteur (inducteur et induit). Pour chaque valeur de l'intensité i du courant représentée par une abscisse Om, la chute de potentiel due à la résistance sera représentée par le segment d'ordonnée $ab = Ri$, et, par suite, la f. é. m. induite devra être mb (car $mb = U - Ri$).

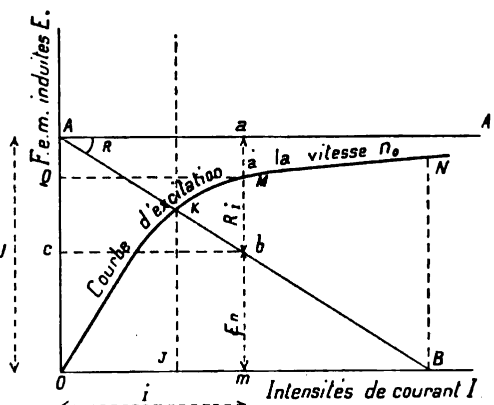


Fig. 521. — Prédétermination des caractéristiques d'un moteur en série d'après sa courbe d'excitation. — Principe du calcul graphique.

Les f. é. m. étant, comme nous venons de le rappeler, proportionnelles aux vitesses, à flux inducteur égal, la vitesse de rotation correspondant à l'intensité de courant Om devra avoir une certaine valeur n, telle que la f. é. m. E_n soit mb au lieu de mM, c'est-à-dire

$$n = n_0 \frac{mb}{mM}.$$

La puissance électrique utile correspondante Ei sera représentée par la surface du rectangle $\overline{Ombc}$, et par suite le couple électromagnétique

$$C_e = \frac{\overline{Ombc}}{2\pi n} = \left(\frac{1}{2\pi n_0}\right) \overline{OmMQ},$$

le facteur entre parenthèses étant une constante. Si l'on connait le rendement η, le couple sur l'arbre s'en déduit en multipliant par ce rendement.

On a donc sur la même épure tous les éléments du problème et l'on peut en déduire la loi de variation du couple et de la puissance à la façon ordinaire, sous forme de courbes rapportées aux vitesses de rotation comme abscisses.

A titre d'exemple, nous donnons (fig. 522) des courbes ainsi déterminées sur un moteur de tramway de 25 chevaux, défini par sa résistance intérieure (0,87 ohm) et par ses pertes évaluées sous forme d'une courbe de rendement.

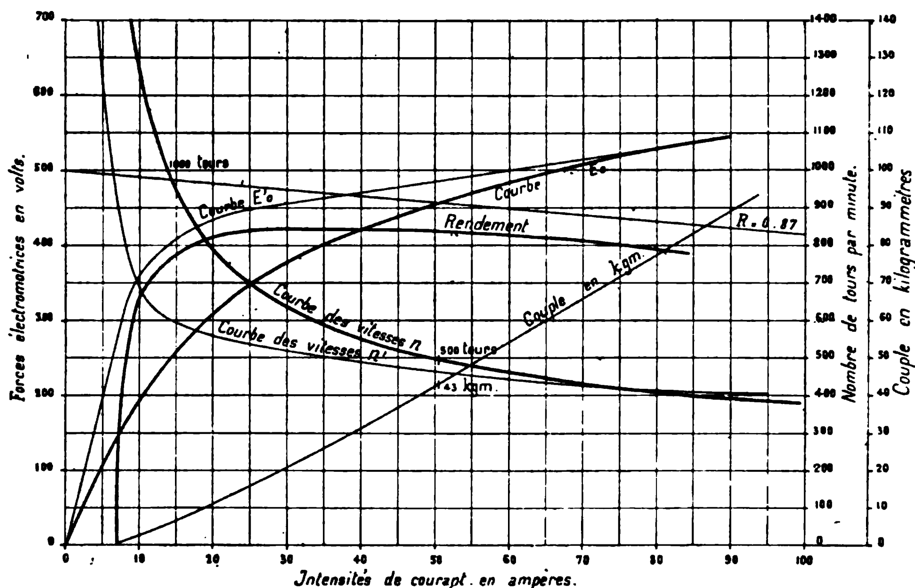


Fig. 522. — Prédétermination des caractéristiques d'un moteur en série d'après sa courbe d'excitation. — Exemple numérique.

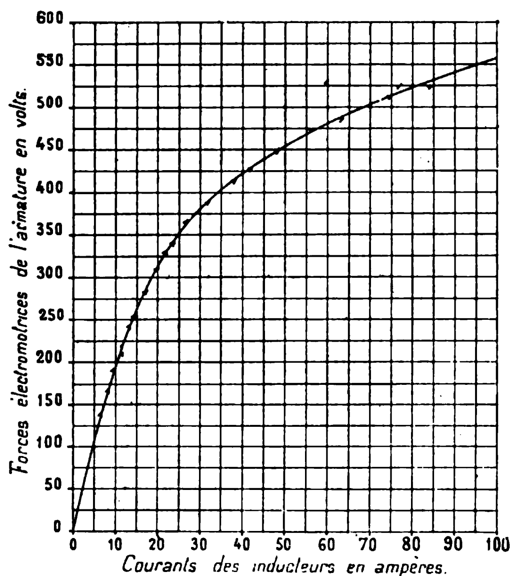


Fig. 523. — Exemple de courbe d'excitation. Moteur G. E. 1000.

Pour montrer l'influence de la loi de saturation du circuit magnétique, nous avons pris deux courbes d'excitation différentes de forme, bien que réalisant le même flux à 80 ampères. La première (courbe E_o), à courbure douce, s'applique au cas d'un moteur à saturation lente ; la seconde (courbe E'_o), à coude prononcé, s'applique à un moteur à saturation rapide (dès 20 ampères). Les courbes de vitesse obtenues ont une allure toute différente, la seconde assurant une variation beaucoup plus faible dans les limites ordinaires de fonctionnement et même à très faible charge. La courbe de couple a été tracée seulement dans la première hypothèse.

On voit que les propriétés des moteurs en série dépendent dans une grande

mesure de la loi de variation de l'induction magnétique. Pendant longtemps on a admis qu'il fallait, pour augmenter la stabilité de marche, saturer très

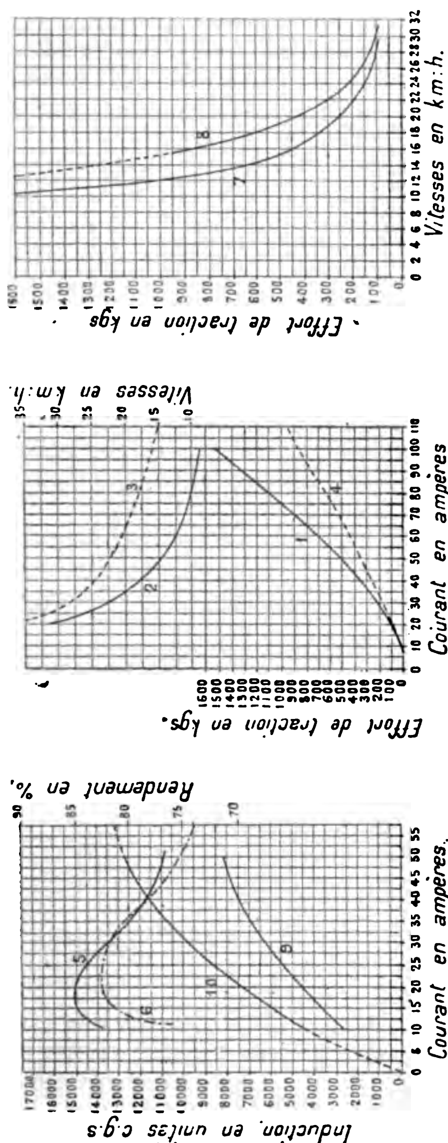


Fig. 524. — Excitations et rendements en fonction du courant.

Fig. 525. — Efforts et vitesses en fonction du courant.

Fig. 526. — Efforts en fonction de la vitesse.

Fig. 524, 525 et 526. — Comparaison entre deux équipements doubles à 2 moteurs de 30 chev. avec noyaux inducteurs et cuirasse de sections différentes.

Courbes 1, 2, 5, 7, 10 : moteurs à larges sections.
— 3, 4, 8, 9 : — faibles —

rapidement les inducteurs et les faire travailler, par conséquent, autant que possible au-dessus du coude de la caractéristique. Aujourd'hui, les constructeurs américains estiment, au contraire, qu'il faut n'atteindre la saturation qu'aux fortes charges, de façon à permettre, à variation égale du courant, un

plus grand accroissement de couple moteur sur les rampes et au démarrage. Dans les bons moteurs américains modernes pour tramways, l'effort de traction à la jante est d'environ 18 à 20 kg. par ampère au démarrage, contre 9 à 11 kg. en marche normale. On réduit ainsi, il est vrai, la puissance *normale* du moteur par rapport à son poids et l'on accroît la variation de vitesse, mais on diminue également l'influence des rampes et des démarrages sur la consommation d'énergie.

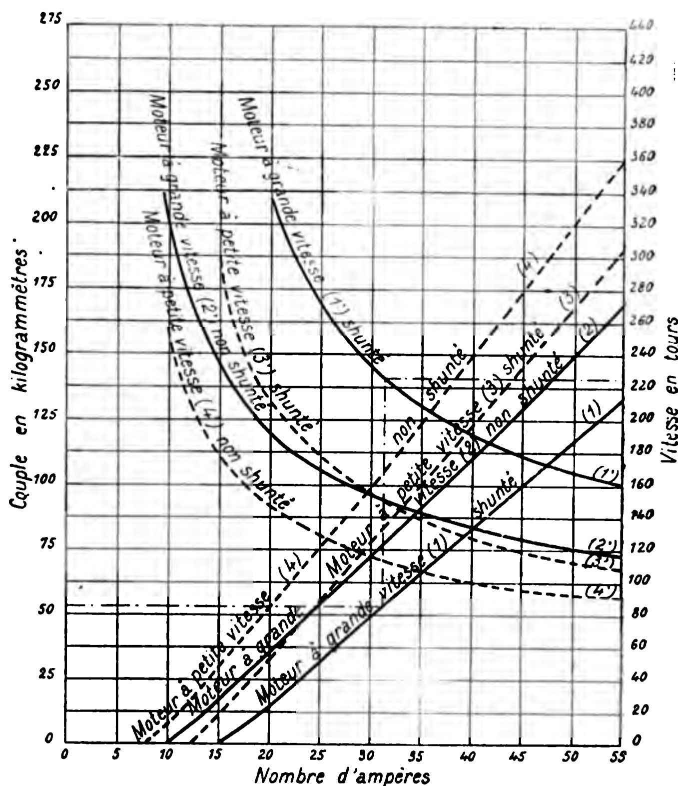


Fig. 527. — Courbes caractéristiques du moteur G.E. 800 à 3 spires (grande vitesse) et 4 spires (faible vitesse); mesures prises sur l'essieu.

La figure 523, relative à l'un des plus récents et des meilleurs moteurs américains, le G.E.1000, montre dans quelles conditions travaille le champ de cet appareil; on voit que le coude est fort arrondi et que le régime moyen (30 ampères) correspond à sa partie moyenne; cette forme s'obtient par l'emploi d'un entrefer assez faible (3 mm.) et de sections largement calculées, aussi bien pour l'induit que pour les inducteurs.

Quelques auteurs estiment qu'on devrait aller plus loin dans cette voie et augmenter encore la section du circuit magnétique: les courbes des figures 524 à 526, relatives à un équipement américain à deux moteurs calculés par M. Baxter et de même puissance que le G.E. 1000, mais encore moins saturés,

donnent une idée du résultat qu'on peut, d'après lui, obtenir ainsi[1]; les courbes de la figure 524 indiquent les inductions réalisées dans l'armature et dans l'entrefer et les rendements correspondants; les figures 525 et 526 font connaître les résultats au point de vue de la vitesse et de l'effort moteur.

La vitesse serait plus faible que celle des moteurs américains ordinaires, très élevée comme on l'a vu au chapitre V; elle présenterait une décroissance beaucoup plus rapide aux fortes charges, ce qui permettrait à l'effort de croître plus vite, tout en maintenant le courant entre des limites plus étroites.

La puissance demandée à l'usine serait plus uniforme, sans que la vitesse commerciale, où les arrêts jouent un rôle irréductible, s'en trouvât bien sensiblement amoindrie. Enfin, grâce aux moindres pertes dans le fer induit, le rendement moyen se trouverait sensiblement amélioré.

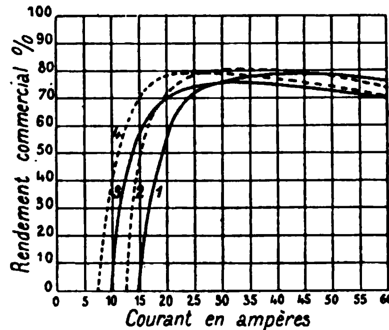


Fig. 528. — Rendements des moteurs définis par les courbes de la figure 527.

Il est évident que des moteurs de ce genre seraient un peu plus lourds que les types actuels. Ce poids supplémentaire est faible cependant à côté de celui de l'ensemble d'une voiture équipée. Mais il ne faut pas se dissimuler que les variations de vitesse ne peuvent être accrues indéfiniment, sous peine de devenir une gêne sérieuse pour l'exploitation; aussi croyons-nous plus sage, au moins actuellement, de s'en tenir au type de saturation du G. E. 1000, à moins qu'on n'adopte le système d'excitation mixte décrit plus loin pour uniformiser la vitesse aux faibles charges.

Effet d'une modification de l'enroulement induit. — En supposant une disposition invariable du circuit des pôles inducteurs, on peut modifier considérablement les propriétés du moteur par un autre procédé, en changeant le nombre des spires de l'induit : la vitesse moyenne diminue, en effet, quand on augmente le nombre de ces spires, en vertu de l'équation (14).

Si l'on remplace un bobinage à N spires de résistance r par un bobinage à N' spires ($N' > N$) de résistance r' (en général, $r' > \frac{N'}{N} r$), la vitesse et, par suite, le rendement sont réduits dans le rapport

$$\frac{n'}{n} = \frac{N(U - r'I + \varepsilon')}{N'(U - rI + \varepsilon)} = \frac{N}{N'} \text{ sensiblement.}$$

A titre d'exemple, nous donnons ici (fig. 527 et 528) les courbes relatives au moteur G.E.800 américain bobiné à 4 ou 3 spires par encoche; ces deux types sont calculés, l'un pour le service urbain, l'autre pour le service de banlieue à grande vitesse. Les courbes 2 et 4 correspondent à l'excitation normale, et les courbes 1 et 3 à une excitation réduite de 1/3 par l'emploi d'un

[1] *Electrical World*, 7 novembre 1896.

shunt. Elles montrent que le couple et le rendement augmentent plus rapidement pour le moteur à vitesse modérée que pour l'autre ; en service normal, le courant varie entre 20 et 40 amp. dans le premier, et entre 25 et 50 amp. dans le second. Le moteur de banlieue exigera donc, à conditions égales, un plus grand courant de démarrage que le moteur urbain. Partout où les arrêts sont fréquents, il y a, par suite, avantage à adopter des moteurs à faible vitesse; la vitesse commerciale, dans laquelle les durées d'arrêt et de mise en vitesse jouent un rôle prépondérant, s'en trouve très peu modifiée, tandis que la dépense d'énergie est fort réduite. Mais le rendement du moteur à 4 spires s'abaisse beaucoup plus rapidement aux fortes charges.

D'autre part, la comparaison des courbes à pleine excitation avec les courbes à excitation réduite de la figure 527 confirme les conclusions précédentes relativement à la saturation des inducteurs.

Choix entre ces modes d'excitation. — Les considérations qui précèdent nous donnent tous les éléments nécessaires pour comparer, au point de vue de la traction, les divers modes d'excitation envisagés, à savoir les excitations en série et en dérivation et l'excitation indépendante qui donne les mêmes résultats que cette dernière.

Au point de vue de la puissance et du rendement, les diverses solutions sont équivalentes lorsque les moteurs sont convenablement construits. C'est donc sur les conditions de fonctionnement seules que peut porter la comparaison.

Depuis longtemps, c'est une idée reçue et presque un axiome que le moteur en série est seul admissible. Le fait que tous les moteurs américains sont actuellement enroulés de cette manière semble même mettre la supériorité de cette excitation au-dessus de toute discussion.

Mais, dans ces dernières années, on a vu essayer les moteurs shunt par quelques constructeurs, surtout en Allemagne par la maison Siemens et Halske ; quelques auteurs ont même prôné cette solution comme un idéal vers lequel on devrait tendre[1]. Il est donc nécessaire d'examiner ici, avec quelques détails, les divers côtés de la question.

Inconvénients des moteurs en dérivation. — Les arguments qu'on a autrefois fait valoir contre l'enroulement en dérivation se résument dans les objections suivantes, qui sont de valeur fort inégale :

1° On a dit[2] que le courant considérable qui traverse les moteurs

[1] Cf. Baxter Jun., *The Electrical World*, 12 décembre 1896.

[2] *Traité des machines dynamos*, de M. S. P. Thompson, 2e édit. française.

en série au moment du démarrage leur donne un champ très puissant, et par suite un couple de démarrage plus fort que celui des moteurs à excitation constante. C'est là un argument plus apparent que réel lorsqu'il s'agit de moteurs où l'on a saturé le fer dès les faibles charges, car au moment du démarrage il n'y a plus de renforcement bien notable du flux à espérer; il suffit du reste, pour le vérifier, d'examiner les courbes de couple en fonction du courant des meilleurs moteurs actuels (fig. 527) : on voit que ce sont sensiblement des lignes droites, tout comme pour un moteur en dérivation. On obtiendrait d'ailleurs, en excitant au même degré les inducteurs du moteur en dérivation, exactement le même couple de démarrage. La véritable objection, c'est qu'il est à craindre que ce couple ne se trouve réduit, comme nous l'avons expliqué plus haut, par une baisse locale de voltage de la ligne et par la réduction d'excitation qui en serait la conséquence. Mais celle-ci peut être fort atténuée lorsque la ligne est bien établie et si l'on a soin de saturer les inducteurs au voltage normal, comme nous venons de le dire.

2° En second lieu, on a prétendu[1] qu'en cas de mauvais contact entre les roues de la voiture et les rails qui servent de retour au courant, on est exposé à voir à certains moments le moteur se désamorcer, et, comme, en l'absence de champ inducteur il n'y a plus de force électromotrice, le courant prendre une valeur dangereuse lorsqu'il se rétablit.

Cette objection est complètement erronée, car les moteurs qu'on emploie pour la traction sont tous capables de s'amorcer eux-mêmes en dérivation ; par conséquent, le contact du trôlet avec le fil aérien ou des roues avec les rails aura beau rester interrompu pendant un certain temps lorsque la voiture est en marche, les inducteurs n'en demeureront pas moins parfaitement excités. Même au démarrage il n'y a rien à craindre si l'on intercale un rhéostat dans le circuit principal[2] et si l'on ferme celui-ci seulement après le circuit d'excitation, comme on le fait partout dans les applications

[1] Kapp, *Electric Transmission of Energy*, 1re édit. Cette objection a disparu des éditions suivantes de cet excellent ouvrage, mais elle continue à être reproduite ailleurs.

[2] Voir la figure 516, p. 84.

industrielles. Cette manœuvre peut être assurée automatiquement par un régulateur de construction appropriée (voir p. 253).

3° Enfin, on objecte la difficulté plus grande d'isoler les bobines inductrices.

C'est là la plus sérieuse critique qu'on puisse faire au moteur shunt. On devrait y ajouter le plus grand volume de ces bobines et la fragilité du fil qui les forme; pour un moteur de tramway, par exemple, il faut 15 à 20 km. de fil de 1 à 2 mm^2. Ces inconvénients ne sont pas insurmontables, car, du moment où l'on isole bien l'armature à 500 volts, il n'est pas impossible de réaliser le même isolement pour des bobines fixes[1]; mais il est difficile de le maintenir à la longue en service.

Lorsqu'on accepte l'emploi d'une batterie d'accumulateurs, on peut éviter toute difficulté en faisant une excitation séparée à bas voltage, l'excitation indépendante jouissant des mêmes propriétés que l'excitation en dérivation et pouvant être maintenue rigoureusement constante. Quant à la différence de prix (500 fr. environ par voiture), elle est vraiment négligeable en comparaison du prix total d'une automobile, qui dépasse 10 000 fr., comme on l'a vu plus haut (t. I, p. 410).

A côté de ces inconvénients, depuis longtemps connus, il en existe d'autres qui ont été signalés plus récemment[2] et qui sont assez importants dans la pratique :

1° On ne peut rompre le circuit des inducteurs seuls que lentement et avec insertion graduelle de résistances[3], par suite de la self-induction considérable de l'enroulement qui peut occasionner une détérioration de l'isolant en cas de rupture brusque et qui produit des arcs très longs au point de rupture.

[1] Sur bien des réseaux de distribution de force, du reste, on emploie des moteurs shunt fixes à 500 volts.

[2] Luxenberg, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 6 mai 1897.

[3] M. Luxenberg croit aussi nécessaire, pour prévenir les effets d'une manœuvre brusque de l'interrupteur de plate-forme ou d'un déraillement accidentel de la roulette du trôlet, d'ajouter en dérivation sur les bornes du moteur une résistance sans induction de 1 000 ohms environ, qui consommerait constamment environ 250 watts en pure perte. Mais, en réalité, c'est là une précaution tout à fait inutile : tant que les inducteurs et l'induit sont couplés en parallèle, les premiers se déchargent à travers le second au moment de la rupture et ne peuvent prendre de tension dangereuse; la mise hors circuit d'un moteur shunt est même plus facile que celle d'un moteur en série, parce que celui-ci présente au courant principal une self-induction de beaucoup supérieure.

Cet inconvénient peut du reste être supprimé en mettant l'enroulement en court-circuit au moment de la rupture (voir p. 195).

On peut, pour ce motif, laisser les inducteurs en circuit pendant les arrêts, mais cela n'est pas nécessaire.

2° Par le fait que les inducteurs restent constamment excités, il peut se produire, lorsque la voiture descend une pente à vide, à grande vitesse, et qu'on met à un certain moment les armatures en circuit, une force électromotrice très supérieure pendant un court instant à la tension normale et capable de brûler les lampes de la voiture. Le même accident peut aussi survenir quand on emploie deux moteurs et qu'on passe brusquement du couplage en parallèle au couplage en série avant d'avoir ralenti la vitesse de la voiture. C'est là un obstacle à l'emploi dans le cas des moteurs shunt de ce mode de réglage extrêmement usité pour les moteurs en série.

3° Comme la self-induction des armatures seules est très faible, les oscillations de courant dans la ligne occasionnées par le passage des touches du collecteur sur les balais se font sentir avec plus d'acuité dans le réseau, et par suite dans les lignes téléphoniques voisines, qu'avec les moteurs en série. Pour les affaiblir, il faut ajouter sur le circuit de chaque voiture une forte bobine de self-induction, consommant une certaine énergie.

Enfin, il faut ajouter qu'en cas de surcharge accidentelle on risque beaucoup plus d'avoir des étincelles aux balais avec un moteur shunt à champ invariable qu'avec un moteur en série, dont le champ croît en même temps que la réaction d'induit.

Avantages de l'excitation constante. — On doit reconnaître, par contre, que le moteur à excitation constante présente sur le moteur en série deux points de supériorité très importants :

1° L'auto-régulation de la vitesse signalée plus haut, qui permet à la voiture de conserver une allure bien régulière sur des rampes variables et dans une certaine mesure avec des potentiels variables sur la ligne, et qui est par suite à recommander toutes les fois qu'on cherche à réaliser une vitesse moyenne maxima ou qu'on a de fortes baisses de voltage à craindre en certains points des lignes; il ne faut pas, du reste, s'exagérer cet avantage pour un service

de tramway, où le régulateur supplée à cette auto-régulation; mais sur les chemins de fer à grande vitesse, où il est très utile que le mécanicien puisse porter toute son attention sur la voie sans avoir à se préoccuper de la conduite des moteurs, l'excitation constante prend une grande valeur pratique;

2° Le fonctionnement du moteur en génératrice dès que l'allure dépasse la limite normale; cette propriété limite la vitesse sur les pentes, en sorte que le moteur constitue un vrai frein automatique, réalisant un arrêt rapide sans produire aucun plat sur les roues[1]; d'autre part, sur les profils accidentés, elle permet de *récupérer* sous forme de courant utile, pendant la descente d'une voiture, une partie de l'énergie dépensée pour sa montée ; ce courant est utilisé par les autres voitures en service sur la ligne, quand il s'agit d'une distribution par fil aérien, ou bien il sert à recharger les accumulateurs, quand on utilise des véhicules munis de ces appareils; on verra plus loin que l'économie ainsi réalisée est très notable sur les lignes à profil accidenté[2]. On peut ajouter que les appareils de manœuvre sont un peu plus simples avec les moteurs en dérivation qu'avec les moteurs en série[3].

L'emploi du moteur excité en dérivation, ou mieux à excitation indépendante, paraît donc le seul rationnel pour la traction par accumulateurs et constitue une solution à certains égards très désirable pour la traction par fil aérien, sur les réseaux où l'on doit réaliser une vitesse de marche bien constante ou qui présentent de fortes déclivités.

C'est pour ce dernier motif que la maison Siemens et Halske a adopté des moteurs en dérivation sur le tramway à crémaillère de

[1] On a objecté qu'il résulte de ce mode de freinage, lorsqu'on l'applique brusquement, des étincelles aux balais et un travail supplémentaire des engrenages qui augmentent les frais d'entretien des moteurs. Mais cette objection ne paraît pas justifiée par l'expérience et tous les ingénieurs qui emploient le freinage électrique en expriment la plus vive satisfaction.

[2] Les conditions pratiques et la valeur économique de cette récupération seront discutées au chapitre XIII.

[3] On a prétendu quelquefois que la régulation du moteur en dérivation était plus élastique que celle du moteur en série à cause de la possibilité qu'elle donne de faire varier le champ dans de grandes limites; mais, en réalité, ces limites sont sensiblement les mêmes que pour un moteur en série, car on ne peut réduire le champ magnétique au-dessous des valeurs actuellement réalisées dans ce dernier type sans produire une rapide augmentation des étincelles aux balais. Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre X.

Barmen. Les bons résultats obtenus à l'aide de ce type de moteur en ont fait étendre l'application à Halle et montrent que les difficultés d'emploi ne sont pas insurmontables. Mais il est à craindre que les réparations de bobines excitatrices ne soient plus fréquentes qu'avec les moteurs en série.

Inconvénients des moteurs en série. — L'inconvénient principal des moteurs en série, c'est qu'on ne peut maintenir leur vitesse constante ; on l'uniformise bien, si l'on veut, en saturant les inducteurs, mais c'est naturellement aux dépens du rendement. Lorsqu'on doit suivre un horaire rigoureux, comme c'est le cas, par exemple, sur les chemins de fer, on peut éprouver de ce côté des difficultés ; on peut, il est vrai, réaliser toutes les vitesses désirables par les méthodes de régulation étudiées au chapitre X; mais c'est aussi presque toujours au prix de pertes d'énergie. Sur les tramways, on peut heureusement se dispenser de cette précision, mais on a toujours à craindre l'emballement sur les faibles pentes que la voiture descend avec peu de courant et où l'emploi du frein serait un contresens.

Si la voiture descend une pente plus forte, le moteur, quelle que soit sa vitesse, ne peut *spontanément* fonctionner comme génératrice, jouer le rôle de frein, car l'inversion du courant dans le moteur intervertirait en même temps la force électromotrice. Si l'on essaie de renverser le sens du courant dans les inducteurs par un changement de connexions, il en est encore de même, et la force électromotrice s'ajoutant alors à la différence de potentiel de la ligne détermine dans le moteur un courant extrêmement intense qui peut arrêter brusquement la voiture et la faire repartir en arrière *au risque de brûler le moteur ;* mais on ne réalise pas ainsi l'effet de frein. Cet effet ne peut être obtenu qu'en supprimant les connexions du moteur avec la ligne et le fermant sur un circuit local contenant au besoin des résistances de valeur appropriée.

C'est là le principe du freinage électrique ordinairement employé et sur lequel nous reviendrons plus loin; mais ce système ne permet pas la récupération de l'énergie.

Avantages de l'excitation en série. — Nous avons déjà signalé la commodité et l'économie de l'excitation en série pour la construc-

tion et l'entretien des bobines. Le démarrage, même en cas de forte baisse de voltage, est toujours bien assuré, grâce à l'énorme renforcement d'excitation qui se produit à ce moment. Le feu aux balais et par suite l'entretien du collecteur sont réduits au minimum.

D'autre part, le moteur en série peut présenter sur les petites lignes un avantage important toutes les fois qu'on ne tient pas à la constance de vitesse : c'est qu'il tend à être *auto-régulateur de puissance*. En effet, la puissance est égale au produit du couple par la vitesse : dans le moteur à excitation constante, qui donne une vitesse constante, elle varie sensiblement comme le couple ; au contraire, dans le moteur en série, surtout lorsqu'il est peu saturé, la vitesse décroît notablement quand le couple augmente et le premier effet tend à compenser, au moins en partie, le second. La figure 518 indique, par exemple, que la variation de puissance en fonction du courant pour un moteur en série croît un peu moins rapidement que l'effort, et la figure 513 montre la loi de variation plus rapide qu'on obtient en maintenant l'excitation constante. Il en résulte que la variation de consommation est notablement réduite.

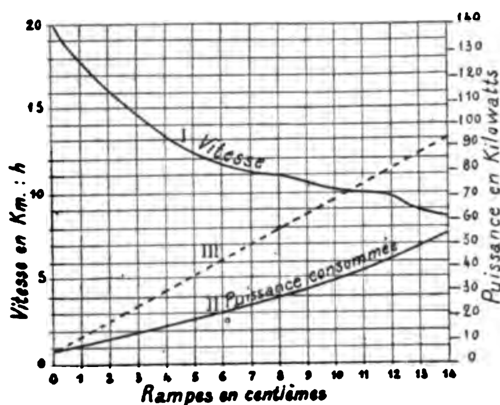


Fig. 529. — Variation de la consommation de puissance sur les rampes de San Francisco, avec deux moteurs en parallèle.

Courbe I. Vitesse sur des rampes variées.
Courbe II. Puissance consommée en kilowatts.
Courbe III. Puissance que consommerait le même équipement si la vitesse était maintenue constante à 20 km : h.

Un exemple intéressant de l'économie de puissance ainsi réalisée résulte des expériences effectuées par M. Foster sur les tramways de San Francisco [1], où, par suite des rampes très fortes rencontrées (jusqu'à 14,5 p. 100), les variations de consommation sont particulièrement sensibles. Les courbes qu'a relevées cet ingénieur (fig. 529) montrent d'une part la décroissance de la vitesse sur des rampes croissant de 0 à 14 p. 100 (courbe I), de

[1] *Street Railway Journal*, juin 1896. Nous avons modifié les échelles de l'auteur.

l'autre la variation de la puissance électrique consommée par une voiture (courbe II) ; en comparant cette dernière à la courbe théorique III, on voit qu'elle est beaucoup moins inclinée que si l'excitation était constante.

On pourrait développer encore beaucoup plus cette propriété d'auto-régulation en saturant moins les inducteurs, mais on est limité assez rapidement dans cette voie par les étincelles qui se produisent aux balais lorsque le champ est trop faible.

Cette tendance à l'auto-régulation de puissance réduit les variations du courant demandé à l'usine par chaque voiture, soit lorsqu'elle démarre, soit lorsqu'elle aborde des rampes, et il en résulte, dans le cas d'un réseau ayant un petit nombre de voitures, une uniformisation très désirable de la charge des génératrices. C'est pourquoi l'excitation en série est à recommander dans ce cas. Au contraire, sur les réseaux ayant un grand nombre de voitures, les variations de la consommation de courant des différentes voitures tendent à s'équilibrer et l'auto-régulation individuelle de la puissance est sans intérêt notable.

Conclusions. — On voit par cette comparaison que chacun des modes d'excitation étudiés plus haut est réalisable pour les moteurs destinés à la traction et leur confère des propriétés spéciales; mais ces propriétés s'excluent mutuellement et chacune des solutions reste ainsi imparfaite. Les défauts de l'excitation en dérivation en rendent l'emploi peu recommandable au point de vue de l'exploitation sur les tramways autres que ceux à accumulateurs, malgré les avantages qu'elle présente.

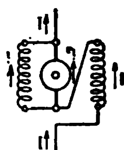
Telle qu'elle est, l'excitation en série est de beaucoup la plus pratique à ce point de vue, et toutes les fois qu'il ne s'agit pas de lignes à profil très accidenté, on peut passer sur ses imperfections.

Mais celles-ci peuvent devenir sensibles lorsqu'on a affaire à de fortes déclivités ou qu'on tient à conserver une vitesse régulière. On peut alors modifier l'excitation en série à l'aide d'artifices qui lui donnent les propriétés utiles de l'excitation en dérivation sans présenter les mêmes inconvénients : ce sont l'excitation compound et l'excitation mixte, réalisables toutes deux à basse tension, comme on va le voir.

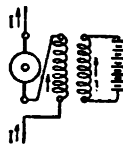
Enfin, sur les chemins de fer, l'auto-régulation de vitesse nous paraît présenter des avantages assez importants pour justifier l'emploi d'une excitation indépendante ou de l'excitation mixte.

Nous compléterons cette comparaison au chapitre X en ce qui concerne la régulation de marche.

Excitation compound. — Le compoundage consiste à placer sur les inducteurs deux enroulements, l'un en série, l'autre en dérivation (fig. 530), en les proportionnant convenablement. Ce genre d'excitation n'est pas employé sur les tramways à fil aérien, parce qu'il compliquerait la construction des moteurs et présenterait tous



Excitation compound ordinaire.



Excitation compound à l'aide d'une source indépendante.

Fig. 530. — Excitation compound.

les inconvénients énumérés ci-dessus de l'enroulement dérivé à 500 volts.

Il n'en est pas de même sur les tramways à accumulateurs, où l'alimentation a lieu à basse tension ; rien n'empêche, dans ce cas, de compounder les moteurs, et cette combinaison peut présenter de sérieux avantages.

On peut en effet, par l'enroulement dérivé, maintenir un certain champ magnétique minimum, qui empêche le moteur de s'emballer à vide, et, par l'enroulement en série, assurer un renforcement énergique du champ au moment des démarrages et sur les fortes rampes, ce qui réduit la vitesse de la voiture en même temps que la fatigue des accumulateurs. En se réservant la possibilité de faire varier le courant dans l'enroulement shunt, on peut enfin réaliser le réglage de la vitesse entre certaines limites.

Mais, si le courant venait à s'inverser dans l'enroulement en série, l'excitation s'abaisserait et le moteur ne pourrait fonctionner convenablement; aussi, lorsque la voiture descend une forte pente où les moteurs tendent à devenir générateurs, faut-il supprimer ou mieux

renverser l'enroulement en série, ce qui est aisément réalisable à l'aide d'un commutateur approprié.

Le compoundage paraît donc une solution rationnelle pour les voitures à accumulateurs. Pour les autres, on n'en voit pas bien l'utilité, si ce n'est dans le but d'éviter l'emballement aux faibles charges sur les pentes.

L'administration des chemins de fer de l'État belge a prévu récemment et à un autre point de vue l'excitation compound pour ses essais de trains-tramways électriques, d'après les études de M. Ernest Gérard : l'excitation normale aura lieu en dérivation et l'enroulement en série sera utilisé seulement aux démarrages comme supplément (voir p. 257).

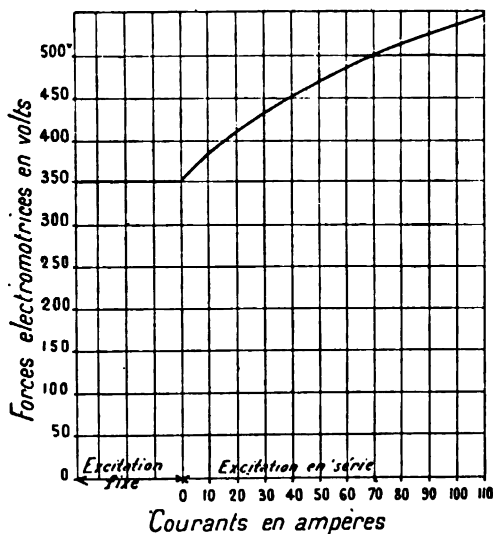


Fig. 531. — Courbe d'excitation d'un moteur compound en fonction du courant d'armature.

L'expérience montrera si les avantages de cette solution, dont le but est de prévenir les inconvénients résultant pour les moteurs shunt d'une baisse accidentelle de voltage sur la ligne d'alimentation, seront suffisants pour justifier la complication de construction et d'entretien qu'elle entraîne; on peut arriver, du reste, à des résultats équivalents par la méthode mixte décrite plus loin, qui s'applique aussi bien aux voitures à accumulateurs.

Régimes d'un moteur excité en compound. — Les courbes de fonctionnement d'un moteur excité en compound se déduisent aisément de la courbe d'excitation. Supposons, par exemple, qu'on prenne le moteur G.E. 1000, défini par la courbe d'excitation de la figure 523, et que, pour empêcher l'emballement aux faibles charges, on remplace les 25/70 des spires inductrices par un autre enroulement parcouru par un courant constant choisi de façon à réaliser les 350 volts d'excitation obtenus précédemment à 25 amp.; on aura en fonction du courant d'induit la nouvelle courbe d'excitation représentée par la figure 531 ;

la résistance des inducteurs en série est réduite à 0,3 ohm; celle de l'induit est de 0,4 ohm. En appliquant à cette courbe la méthode indiquée plus haut (fig. 521, p. 91), on obtient immédiatement les caractéristiques de la figure 532; en comparant celles-ci aux caractéristiques primitives en traits pleins, on voit nettement le résultat obtenu, c'est-à-dire la réalisation d'une vitesse beaucoup plus constante et en tout cas rigoureusement limitée.

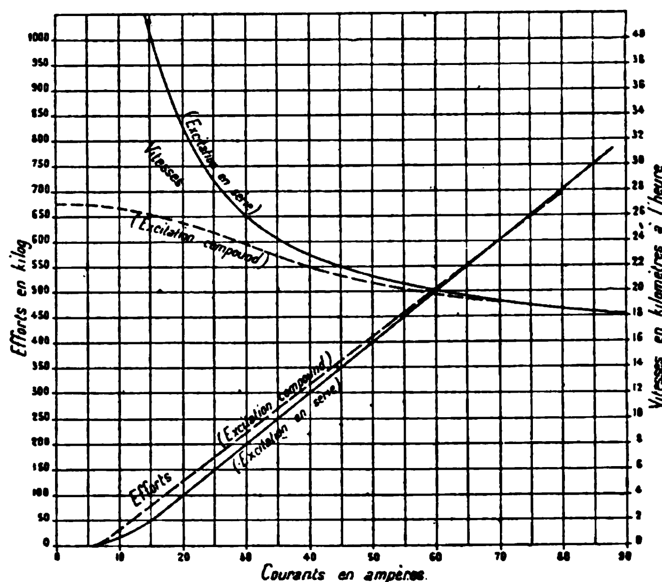


Fig. 532. — Caractéristiques du moteur compound défini par la courbe d'excitation de la figure précédente en fonction du courant principal, et comparaison avec les courbes du même moteur excité simplement en série.

Excitation mixte. — Ce système proposé par les auteurs consiste dans l'emploi d'un moteur muni de bobines inductrices capables de supporter, au moins temporairement, un fort courant et d'une batterie d'accumulateurs à bas voltage, pouvant débiter un courant comparable à celui de l'armature, les bobines magnétisantes des inducteurs étant disposées de manière à pouvoir être alimentées à volonté, soit par le courant d'armature, soit par la batterie d'accumulateurs, soit par tous deux à la fois.

Les figures 533, 534 et 535 représentent ces trois combinaisons; L montre le trôlet, T le rail de retour du courant, A l'armature du moteur, M les bobines magnétisantes, B la batterie d'accumulateurs, R une résistance qu'on peut intercaler à volonté à la suite

des bobines magnétisantes pour faire varier l'intensité du courant qui les traverse, et R' une résistance sur laquelle on peut, lorsque c'est nécessaire, fermer l'armature en court-circuit pour produire le freinage électrique de la voiture.

Des commutateurs convenables permettent de placer à volonté la batterie et les bobines magnétisantes dans chacune de ces trois positions, tout en effectuant d'autre part les autres combinaisons adoptées pour le réglage ordinaire des moteurs de traction, ainsi qu'on le verra au chapitre X.

Dans la première disposition (fig. 533), le moteur se comporte comme un moteur en série ordinaire. Dans la seconde (fig. 534), il se trouve en excitation indépendante, et la voiture prend une vitesse

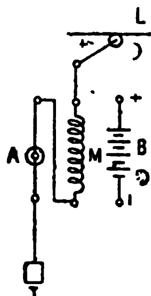


Fig. 533. — Excitation en série.

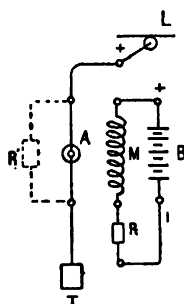


Fig. 534. — Excitation indépendante.

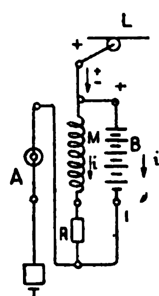


Fig. 535. — Excitation mélangée.

Fig. 533, 534 et 535. — Schéma des trois combinaisons de l'excitation mixte.

sensiblement constante à toutes charges et qu'on peut régler à volonté en modifiant la résistance R du circuit d'excitation. Dès que la voiture dépasse un peu la vitesse fixée, le moteur fonctionne comme génératrice et envoie du courant sur la ligne; la voiture ne peut donc s'emballer, même sur les pentes, et le travail de la descente est récupéré par les voitures voisines. Enfin, grâce à la présence d'une excitation permanente, il suffit de fermer l'armature en court-circuit pour arrêter instantanément la voiture.

Dans la troisième position (fig. 535), le courant qui traverse l'armature se partage en deux parties : l'une passe à travers les inducteurs, l'autre à travers la batterie. Suivant les valeurs relatives du courant d'armature I, de la force électromotrice de la batterie *e*, de la résistance *r* des bobines M et de la résistance variable R, le

courant I se partagera d'une manière différente entre les inducteurs (courant i) et la batterie (courant i') ; le courant de la batterie pourra être positif ou négatif, c'est-à-dire que la batterie pourra se charger ou se décharger selon les cas. En appelant r' la résistance ohmique de la batterie et en comptant les courants positivement dans le sens des flèches, on a les relations :

$$e = (r + R)i - r'i',$$

$$i + i' = I.$$

D'où

$$i' = \frac{(r + R)\,I - e}{r + R + r'},$$

$$i = \frac{e + r'I}{r + R + r'},$$

$$\frac{i'}{i} = \frac{(r + R)\,I - e}{e + r'I}.$$

Comme la résistance r' est toujours très petite, la différence de potentiel aux bornes de la batterie est sensiblement fixe, quel que soit le courant I. L'excitation du moteur tend donc à rester constante à toute charge, lorsque R est constant. En choisissant la f. é. m. e de la batterie de façon à avoir

$$e = rI \text{ moyen},$$

on pourra établir une compensation complète entre la charge et la décharge de la batterie pendant une journée de service. D'ailleurs, on peut n'employer la batterie que peu de temps chaque jour, en s'en servant seulement lorsque cela est nécessaire ; la plus grande partie de l'énergie consommée par l'excitation est prise directement à la ligne. Si la batterie a besoin d'être rechargée, il suffit d'intercaler momentanément la résistance R suffisante : par exemple, en intercalant une résistance R égale à celle des bobines r, le courant se trouve réduit d'environ moitié dans ces bobines et le surplus passe dans la batterie.

Pour tirer parti de ces propriétés, il suffit d'employer les trois combinaisons dans les conditions convenables, c'est-à-dire :

La combinaison n° 1 pour le démarrage et lorsqu'on veut renforcer le champ, ainsi que dans les cas où l'on n'a pas besoin d'une vitesse constante ;

La combinaison n° 2 sur les pentes pour récupérer de l'énergie et aussi pour le freinage électrique ;

Enfin, la combinaison n° 3 sans résistance lorsqu'on veut une vitesse constante, et avec une résistance R pour recharger la batterie ou pour diminuer l'excitation du moteur et augmenter ainsi la vitesse.

Ce système rend, comme on le voit, extrêmement facile l'obtention d'une vitesse constante, tout en donnant d'excellents démarrages. Il permet, tout en employant les moteurs existants sans changer les bobines excitatrices, de réaliser la récupération sur les pentes. L'emploi d'une batterie est sans inconvénient, parce que, même si elle était mise hors service, le fonctionnement des moteurs resterait assuré. Elle est d'ailleurs extrêmement peu importante : par exemple, pour une voiture munie d'un moteur de 25 chev. ayant une résistance d'inducteurs d'environ 0,8 ohm et consommant un courant moyen de 20 ampères, il suffit d'une batterie de 20 ampères $\times$ 16 volts $=$ 320 watts, dont le poids total au débit de 1 à 2 ampères par kg. de plaques ne dépasse pas 150 à 200 kg. On la laissera à demeure dans la voiture.

On peut du reste, comme pour l'excitation indépendante (voir p. 77), remplacer la batterie par un petit transformateur à courant continu, alimenté en dérivation par le trôlet. Ce transformateur consiste en deux dynamos accouplées : l'une, jouant le rôle de moteur, est actionnée par le courant pris sur la ligne ; l'autre, servant de génératrice, débite le courant à basse tension nécessaire à l'excitation des moteurs. On en montera le secondaire aux bornes des inducteurs, exactement comme pour la batterie à remplacer.

Ce mode de réglage peut, en définitive, rendre des services sur tous les réseaux où les pentes dépassent 1,5 à 2 p. 100, car il permet de récupérer les dépenses d'énergie nécessaires à l'ascension des rampes, qui sont prépondérantes par rapport à celles nécessaires au roulement. On rendrait ainsi pratique la récupération, même sur les voies à trôlet où elle n'existe pas actuellement, et sans qu'il soit nécessaire de changer les moteurs.

Alimentation des moteurs à tension variable. — Sans maintenir l'intensité constante automatiquement, on peut être amené à

modifier dans certains cas le voltage d'alimentation. On peut supposer, par exemple, que deux tronçons de ligne soient alimentés l'un à 400, l'autre à 600 volts, soit par suite d'une disposition voulue, soit par le fait de la perte de charge le long des conducteurs. Il est intéressant de se rendre compte comparativement du fonctionnement d'un même moteur dans ces conditions différentes.

Les formules indiquées plus haut donnent aisément la solution de cette question dans tous les cas d'excitation.

1° Si le moteur est *excité d'une façon constante* par une source indépendante, le couple sera toujours proportionnel au courant : sur une rampe constante, celui-ci ne variera donc pas ; au contraire, la vitesse variera à peu près proportionnellement à la différence de potentiel aux bornes U.

2° Il en sera de même pour un moteur *excité en série*, parce qu'à courant égal il reproduira toujours la même excitation.

Dans ces deux cas, les courbes de couple obtenues en fonction du courant à un voltage quelconque U' sont donc les mêmes que les courbes obtenues pour un voltage U. Les courbes de vitesse sont seules modifiées et d'une façon qu'il est facile de déterminer. Soit, en effet, r la résistance de la partie du moteur placée dans le circuit principal (induit dans le cas de l'excitation séparée, induit et inducteur dans le cas de l'excitation en série), la vitesse n' obtenue sous le courant I au voltage U' et la vitesse n obtenue sous le même courant au voltage U sont dans le rapport des forces électromotrices induites (le flux restant le même),

$$\frac{n'}{n} = \frac{E'}{E} = \frac{U' - rI}{U - rI}. \tag{39}$$

On peut donc d'une première courbe de vitesse au voltage U déduire par points la courbe au voltage U'. Si $n' < n$, on voit que cette courbe s'abaisse plus vite que la première pour les charges croissantes.

L'effort étant constant, sous un courant I, la puissance mécanique recueillie varie dans le même rapport que la vitesse ; la puissance dépensée étant UI dans le premier cas et U'I dans le second, les rendements sont dans le rapport

$$\frac{\eta'}{\eta} = \frac{n'}{n} : \frac{U'}{U} = \frac{1 - \frac{rI}{U'}}{1 - \frac{rI}{U}}, \tag{40}$$

c'est-à-dire qu'ils décroissent avec U' et d'autant plus vite que la charge est plus forte.

La figure 536 représente, par exemple, les courbes à 250 volts du moteur en série étudié plus haut (fig. 518), déduites en multipliant les ordonnées de la courbe de vitesse par le rapport

$$\frac{250 - 1{,}60\ I}{500 - 1{,}60\ I}$$

et celles de la courbe de rendement par

$$\frac{1-\frac{1,60}{250}I}{1-\frac{1,60}{500}I}.$$

Au lieu de réduire les ordonnées des courbes, on peut plus simplement se contenter de modifier les échelles.

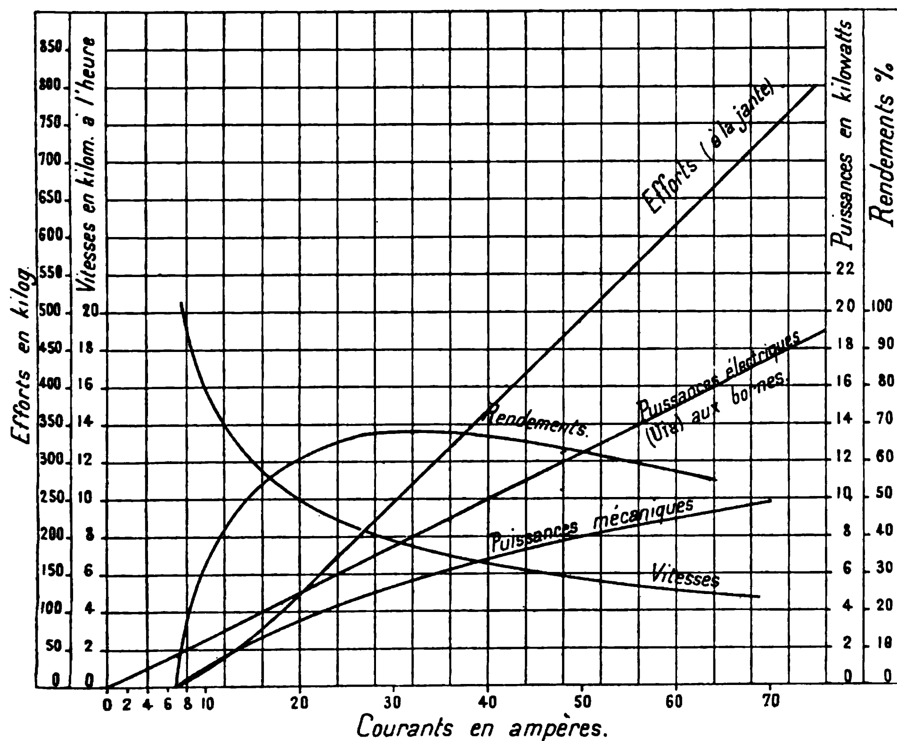


Fig. 536. — Effet de la variation du voltage aux bornes. — Caractéristiques à 250 volts du moteur de tramway défini à 500 volts par les courbes de la figure 518.

Comme second exemple plus complet, les figures 537, 538 et 539 montrent trois courbes relatives à un même moteur de chemins de fer de 2 000 kilogrammètres : s. sur l'arbre (à 176 ampères), alimenté à 500, 250 et 125 volts. Nous avons réduit les échelles dans la même proportion 500 : 250 : 125 pour les vitesses et les puissances, sans toucher à celles des couples et des rendements. Dans ces conditions, si les moteurs avaient une résistance nulle, les trois figures devraient être exactement superposables ; mais, par suite du terme rI, cela n'existe que pour les courbes de couple et de puissance électrique ; les trois autres présentent des maxima décroissant avec le voltage, en même temps qu'elles s'abaissent plus rapidement vers la droite.

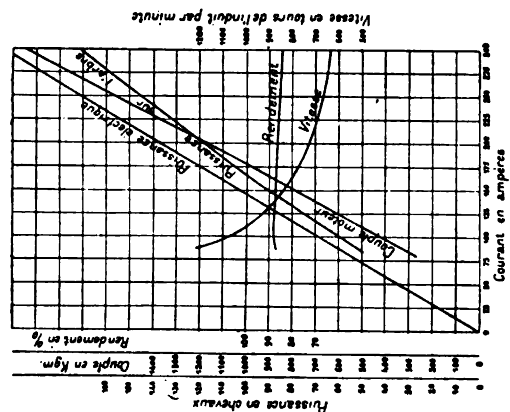


Fig. 537. — Alimentation à 500 volts.

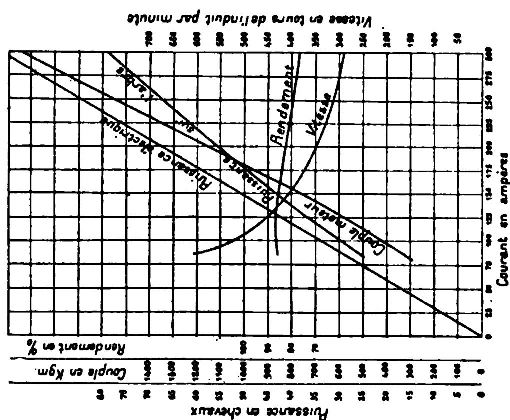


Fig. 538. — Alimentation à 250 volts.

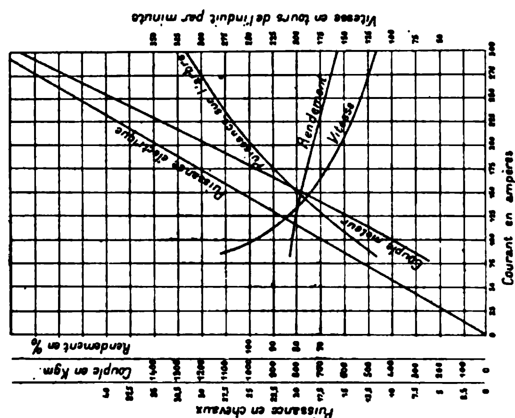


Fig. 539. — Alimentation à 125 volts.

Fig. 537, 538 et 539. — Alimentation d'un moteur en série à potentiel variable. — Caractéristiques d'un moteur de chemin de fer de 75 kilowatts (Baldwin-Westinghouse) à 500, 250 et 125 volts.

3° Pour un moteur *excité en dérivation*, le courant d'excitation décroît proportionnellement à la tension aux bornes : le couple et la vitesse varient donc tous deux lors même que le courant d'armature ne change pas et cette variation ne peut être déterminée qu'au moyen de la courbe d'excitation lorsqu'on la possède.

Soit OM (fig. 540) cette courbe, dont les abscisses représentent les ampères-tours d'excitation ou les courants eux-mêmes et les ordonnées les f. é. m. induites E dans l'induit à circuit ouvert à une vitesse de rotation constante n_0. Soient Om_0 les ampères-tours à la vitesse n_0 et U_0 la f. é. m. correspondante m_0M_0.

Le courant d'excitation i est égal, d'après la loi d'Ohm, à la différence de potentiel aux bornes, divisée par la résistance constante de l'enroulement; par suite, si l'on appelle q le nombre de spires de l'enroulement inducteur, on a

$$\frac{E}{qi} = \text{constante} = \frac{m_0M_0}{OM_0}.$$

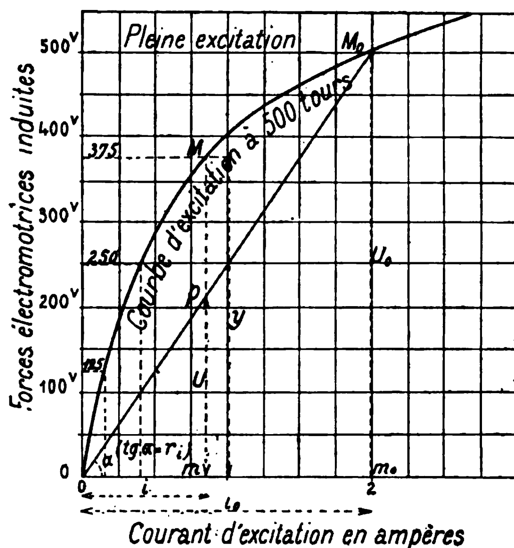


Fig. 540. — Courbe d'excitation du moteur shunt de la figure 541.

Si donc on trace la droite OM_0 passant par l'origine et le point M_0, les ordonnées de cette droite sont proportionnelles aux voltages aux bornes qui produisent les diverses valeurs des ampères-tours. Pour tout voltage U ainsi représenté par une ordonnée mp de la droite OM_0, la f. é. m. induite à la vitesse n_0 est représentée par l'ordonnée mM de la courbe ; pour l'égaler à la précédente, il faut réduire la vitesse dans le rapport

$$\frac{n}{n_0} = \frac{mp}{mM} = \frac{U}{y}.$$

On obtient ainsi la vitesse théorique du moteur tournant à vide lorsqu'il est alimenté au voltage U, d'après la vitesse obtenue dans les mêmes conditions au voltage U_0. Grâce à la forme ordinaire de la courbe d'excitation, si l'on place le régime normal dans la région du coude de façon que la ligne OM_0 soit presque confondue avec la courbe, la vitesse à vide (et, par suite, en charge) pourra varier très peu avec le voltage aux bornes, ce qui confirme une remarque faite plus haut (p. 84) en faveur de l'excitation en dérivation.

Comme l'excitation ne dépend que du voltage U aux bornes, les courbes de vitesse à des potentiels constants quelconques en fonction du courant se déterminent comme on l'a vu plus haut dans l'étude du fonctionnement du moteur

à excitation constante : sous le courant I, par exemple, la vitesse n devient $n' = n\left(1 - \frac{rI}{U}\right)$; les courbes (fig. 541) vont ainsi en tombant vers la droite d'autant plus vite que la tension d'alimentation est plus basse.

Le couple moteur est, à courant d'induit constant, sensiblement proportionnel au flux inducteur et par suite au rapport des ordonnées de la courbe d'excitation :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{mM}{m_0M_0} = \frac{y}{U_0}, \tag{41}$$

en appelant y l'ordonnée mM de la courbe.

La figure 541 donne un exemple de ces régimes sous les tensions de 500, 375, 250 et 125 volts pour le moteur étudié plus haut (p. 80) et dont la courbe d'excitation vient d'être donnée.

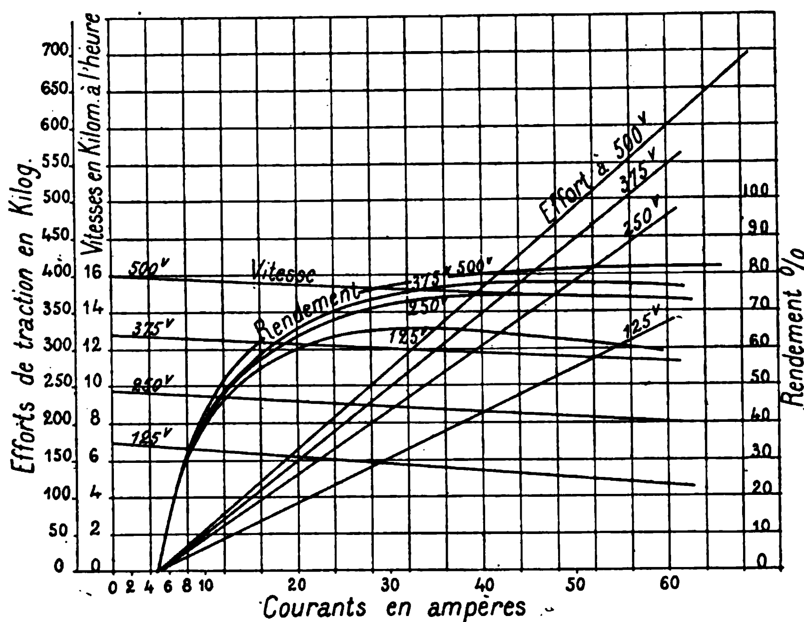


Fig. 541. — Caractéristiques du moteur shunt défini par la courbe d'excitation de la figure précédente et alimenté à 500, 375, 250 et 125 volts.

La puissance motrice réalisée à chaque régime varie comme le produit du couple par la vitesse, et par suite les rendements sont dans le rapport

$$\frac{\eta'}{\eta} = \frac{Cn'}{C_0n_0} : \frac{U}{U_0} = \frac{y}{U_0}\,\frac{U\left(1 - \frac{rI}{U}\right)}{y\left(1 - \frac{rI}{U_0}\right)} : \frac{U}{U_0} = \frac{1 - \frac{rI}{U}}{1 - \frac{rI}{U_0}}. \tag{42}$$

Alimentation des moteurs à intensité constante. — On a proposé à diverses époques d'appliquer aux tramways électriques la distribution en série, qui a été utilisée en petit dans le telphérage *Fleeming Jenkins*. Ce mode de distribution suppose implicitement qu'on fait l'alimentation à intensité constante. Dans ce système, tous les moteurs seraient groupés en série sur une ligne fermée, ainsi que cela a lieu, par exemple, dans la célèbre distribution de force de Gênes, où l'usine génératrice est munie de dispositifs qui permettent de faire varier le voltage tout en maintenant invariable l'intensité du courant. Sans nous préoccuper ici de la réalisation de cette idée au point de vue du réseau de distribution, il est intéressant d'examiner quelles en seraient les conséquences au point de vue du fonctionnement des moteurs.

On voit immédiatement qu'il ne faut pas songer à employer le moteur shunt, car il n'aurait pas aux faibles vitesses une excitation suffisante ; en admettant qu'on assure celle-ci au moment du démarrage en intercalant un rhéostat en série avec l'armature entre les bornes des inducteurs, on risquerait toujours, une fois qu'on aurait supprimé cette résistance, de voir le moteur caler brusquement sous l'effet d'une augmentation d'effort résistant.

Admettons donc qu'on emploie le moteur en série. Le courant étant constant dans les inducteurs et l'armature, le couple statique le sera également ; on ne pourra donc faire démarrer le moteur que si, à ce moment, le couple résistant est inférieur au précédent. En vertu de cette différence, le moteur se mettra en marche et prendra une vitesse croissante ; celle-ci augmenterait indéfiniment si le couple de pertes et la résistance de l'air ne croissaient en même temps : il arrivera ainsi un moment où le couple résistant fera équilibre au couple dynamique. Mais, comme ces deux couples varient très lentement dans les limites de vitesse ordinaires[1], on voit qu'on n'aura qu'une faible stabilité de marche et que le conducteur aura fréquemment à régler la vitesse.

Ce réglage de vitesse se fera en modifiant le nombre des ampères-tours sur le circuit inducteur, comme on le verra plus loin au chapitre X.

[1] Le couple dû aux pertes est sensiblement constant à excitation constante (p. 72, équation 20). La résistance à la traction ne varie rapidement qu'aux grandes vitesses.

On peut d'ailleurs le rendre dans une certaine mesure automatique à l'aide d'appareils basés sur le principe des régulateurs à force centrifuge et déjà employés pour les moteurs fixes.

Il faut remarquer enfin que, pour se réserver au démarrage la disposition d'un couple à peu près triple du couple normal sans augmenter le courant dans l'armature, comme cela est nécessaire, il faudrait, si l'on n'employait qu'un moteur, se condamner à marcher au régime normal avec des inducteurs peu saturés, et par suite avec des moteurs de trop faible puissance spécifique. Mais cette sujétion disparaît si l'on emploie plusieurs moteurs dont on change le mode de couplage, comme on le verra ci-dessous.

Pour ces motifs, l'emploi de la distribution en série pour la traction n'est pas utopique en ce qui concerne le fonctionnement des voitures, indépendamment des difficultés mêmes de cette distribution, qui ne seront pas examinées ici.

§ 3. — Mode d'accouplement électrique des moteurs d'une même voiture

Cas de deux moteurs. — Lorsqu'une voiture est munie de deux moteurs, il y a lieu de se demander comment leurs circuits doivent être disposés l'un par rapport à l'autre pour recevoir le courant de

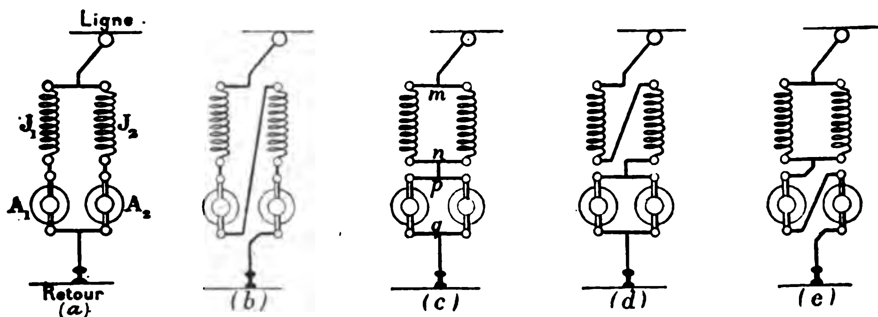


Fig. 542. — Divers modes de groupement possibles de deux moteurs excités en série.

la ligne, autrement dit comment on doit les grouper au point de vue électrique. Nous examinerons séparément le cas des moteurs excités en série et celui des moteurs excités en dérivation.

1° **Moteurs excités en série.** — On peut disposer les premiers, soit en dérivation suivant le schéma *a* (fig. 542), soit en série suivant le schéma *b* ; en outre, si l'on considère l'induit et l'inducteur comme deux parties distinctes, on peut, en combinant des inducteurs en série avec des induits en parallèle, ou inversement, réaliser trois autres groupements mixtes représentés par les schémas *c*, *d*, *e* de la même figure.

Inconvénients des groupements mixtes. — Les groupements *c*, *d*, *e* sont aujourd'hui abandonnés pour les motifs que nous allons expliquer.

Les dispositifs *c* et *d*, dont le premier a été employé pendant plusieurs années par la Compagnie Edison et qui sont d'ailleurs équivalents si l'on emploie pour l'enroulement des inducteurs de *d* un nombre de spires moitié moindre que pour celui des inducteurs de *c*, n'ont de raison d'être que par la simplification qu'ils apportent à la manœuvre d'inversion de marche; les armatures ne formant, en effet, qu'un seul circuit, un seul commutateur suffit pour intervertir le sens du courant à la fois dans les deux, tandis qu'il faut deux commutateurs avec la disposition *a*. Mais ce montage entraîne des inconvénients graves, par suite des surcharges considérables qu'il peut imposer à un moteur aux dépens de l'autre.

Il est, en effet, à peu près impossible en pratique d'égaliser exactement les champs magnétiques des deux moteurs, non seulement dans le dispositif *c*, où les résistances ohmiques des deux enroulements peuvent être différentes, mais encore dans le dispositif *d*, parce que la moindre inégalité dans la valeur de l'entrefer ou la perméabilité du fer entraîne une inégalité de flux correspondante; celle-ci a pour conséquence une différence entre les deux f. é. m. E_1 et E_2 des armatures, qui sont proportionnelles aux flux. En appelant r_a la résistance intérieure de l'armature, supposée égale pour toutes deux, et u la différence de potentiel commune entre p et q, c'est-à-dire entre balais, les courants des deux armatures seront respectivement

$$I_1 = \frac{u - E_1}{r_a} \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{u - E_2}{r_a},$$

et leur rapport

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{u - E_1}{u - E_2}.$$

E_1 et E_2 étant très voisins de u (condition nécessaire pour un rendement convenable), la moindre différence entre E_1 et E_2 peut faire varier ce rapport dans une large mesure, par suite de la faible résistance des armatures.

Un exemple le fera bien comprendre.

Soit un moteur de 25 chev. environ sous 500 volts marchant normalement à un régime de 40 amp. environ. Supposons que les armatures aient chacune la même résistance, 0,5 ohm, et les inducteurs 0,9 ohm. Avec le groupement c, la différence de potentiel *aux balais* aura pour valeur normale

$$u = 500 - 0{,}9 \times 40 = 464 \text{ volts}$$

et la f. é. m. intérieure

$$E' = 464 - 0{,}5 \times 40 = 444 \text{ volts.}$$

Supposons qu'on accouple en parallèle deux moteurs semblables, mais que leurs champs soient différents de 4 p. 100 environ : l'une des forces électromotrices sera par exemple 452 et l'autre 436, la moyenne des deux restant 444. Les deux courants seront donnés par les équations

$$I_1 = \frac{u - 452}{0{,}5}$$

$$\text{et } I_2 = \frac{u - 436}{0{,}5}.$$

Le voltage aux balais u restera nécessairement le même.

On aura donc

$$I_1 = \frac{464 - 452}{0{,}5} = 24 \text{ ampères}$$

$$\text{et } I_2 = \frac{464 - 436}{0{,}5} = 56 \text{ ampères.}$$

Une simple différence de 4 p. 100 sur les flux amène ainsi une inégalité de plus de 100 p. 100 sur les courants.

La Compagnie Edison a cherché à réduire cet effet par un artifice consistant à placer sur les inducteurs de chacun des moteurs une bobine d'équilibre parcourue dans le sens démagnétisant par le courant d'armature de l'autre, de façon à réduire l'excitation du moteur qui travaille le moins et renforcer celle du moteur qui travaille le plus. Mais cette disposition n'a eu que des succès très divers : souvent elle augmentait le mal au lieu d'y remédier, et l'on

a finalement abandonné partout ce genre de couplage au profit du couplage équivalent *a*, dans lequel, comme on le verra ci-dessous, l'inconvénient de l'inégalité des courants est fort atténué [1].

Le schéma *d* présente les mêmes défauts et doit être rejeté également. Enfin, le schéma *e* ne présente pas d'avantages particuliers; on pourrait peut-être l'employer à titre d'artifice de réglage pour augmenter à un moment donné la vitesse des moteurs en série, supposés disposés d'abord d'après le schéma *b*; mais il est plus simple de shunter les inducteurs par une résistance extérieure, comme on le verra plus loin, ce qui enlève toute raison d'être à ce dispositif.

En définitive, les seuls groupements qu'il y ait lieu d'employer sont les couplages simples *a* et *b*, dont nous allons examiner de plus près les propriétés au double point de vue des vitesses relatives que ces combinaisons peuvent réaliser et de la répartition inégale du courant que l'on peut craindre.

Vitesses. — Supposons qu'il n'y ait aucun glissement des roues sur les rails et que l'effort moteur se partage également entre les deux essieux. Dans le cas du couplage en parallèle, les f. é. m. des deux moteurs supposées égales sont isolément opposées à la différence de potentiel de la ligne; la vitesse V_0 que prennent les moteurs est celle qui limite le courant dans chacun à la valeur I nécessaire pour produire le couple moteur suffisant $C = f(I)$.

Lorsqu'on couple les deux moteurs en série, les deux forces électromotrices s'ajoutent pour s'opposer à la différence de potentiel [2]; en négligeant l'effet des résistances intérieures (voir p. 124) il faudra donc, pour ramener le courant commun à la même valeur que celle réalisée précédemment dans chaque moteur, une vitesse moitié moindre $V' = \frac{V_0}{2}$. Si l'effort résistant est le même à toute

[1] Il eût été, du reste, possible de s'affranchir de toute difficulté en prenant la peine d'appareiller les moteurs à l'usine d'après un essai de voltage fait avec précision ; mais en Amérique, où ces moteurs sont fabriqués par séries, on n'aime guère faire ces essais. On égalise quelquefois les champs en plaçant de petites cales dans le joint de fermeture de la carcasse du moteur qui a le champ le plus puissant, ce qui a pour effet d'accroître l'entrefer de ce moteur.

[2] La différence de potentiel à laquelle se trouve soumis chaque moteur n'est ainsi que la moitié de celle de la ligne ; l'isolement est donc plus facile pour les moteurs placés en série que pour ceux placés en dérivation.

allure, ce qui est peu éloigné de la vérité dans les limites de vitesse des tramways, on arrive donc à cette conclusion qu'en couplant les moteurs en série la vitesse est sensiblement la moitié de ce qu'elle était avec le couplage en dérivation.

Dans le cas plus général où l'effort de traction nécessaire diminue avec la vitesse, le couple moteur $C = f(I)$ serait un peu plus fort que le couple résistant à la nouvelle allure, et par conséquent la voiture pourra conserver une vitesse un peu supérieure à la moitié de celle obtenue d'abord. On verra ci-dessous (p. 150) comment tous ces calculs de vitesse peuvent être effectués rigoureusement d'après les courbes caractéristiques. Mais la règle approximative de la réduction à demi-vitesse est suffisante ici pour le raisonnement.

Elle conduit à deux conclusions intéressantes.

On ne doit pas adopter d'une manière invariable pour une voiture le couplage en série, car, en cas d'accident à l'un des moteurs, l'autre ne pourrait être mis en service seul qu'en acceptant une vitesse exagérée; au contraire, lorsque les moteurs sont groupés en dérivation, il suffit de mettre hors circuit celui qui est détérioré et l'autre peut ramener la voiture à la remise à une vitesse seulement un peu moindre que la vitesse normale. On verra plus loin d'autres arguments encore contre le couplage en série.

En adoptant alternativement les deux couplages, on peut réaliser avec une même voiture deux vitesses très différentes dans d'égales conditions de rendement. Cette remarque est le principe même du procédé le plus employé aujourd'hui pour la régulation de la vitesse, sous le nom de méthode « série-parallèle » (p. 150).

Inégalité des courants. — Les inégalités des champs magnétiques des deux moteurs ne peuvent produire d'inégalité de courant que dans le cas du couplage en parallèle; mais, eu égard aux résistances supplémentaires introduites dans les circuits des deux armatures par les inducteurs, les inégalités de courant se trouvent réduites proportionnellement à la somme des résistances autres que la résistance d'armature. Comme elles renforcent d'ailleurs le champ du moteur le plus chargé aux dépens de celui du moteur le moins chargé, la force contre-électromotrice du premier l'emporte sur celle du second, et cette différence tend à ramener les courants

à l'égalité. Grâce à cet effet compensateur, il est peu à craindre qu'un des moteurs soit détérioré par un excès de courant[1].

2° Moteurs excités en dérivation ou à excitation indépendante. — Les modes de groupement principaux des moteurs excités en dérivation sont représentés par les schémas *a*, *b*, *c*, *d* de la figure 543 ; dans le schéma *c*, on pourrait aussi supposer les inducteurs en parallèle et non en série, ce qui porte encore à 5 le nombre des combinaisons possibles. Les dispositifs *a* et *d*, dans lesquels les deux induits sont en parallèle, présentent les mêmes inconvénients que ceux signalés plus haut pour les groupements *c* et *d* (fig. 542), c'est-

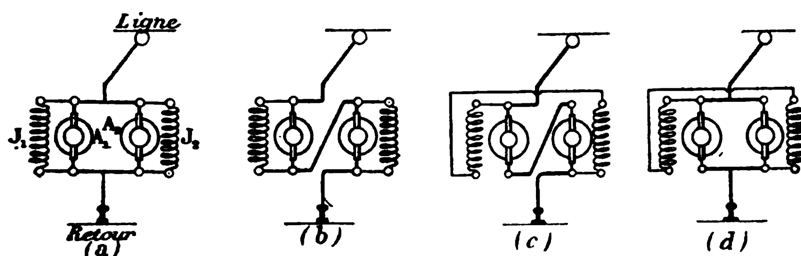


Fig. 543. — Divers modes de groupement possibles de deux moteurs excités en dérivation.

à-dire la difficulté d'égaliser les charges des deux moteurs s'ils n'ont pas bien exactement les mêmes champs magnétiques. Le schéma *d* est à rejeter pour ce motif. Dans le dispositif *a*, on peut, il est vrai, régler l'excitation de l'un ou l'autre moteur à l'aide d'un rhéostat de champ jusqu'à ce que tous deux donnent bien la même f. é. m., quand la voiture marche régulièrement sans glissement d'aucun des essieux[2]; ce réglage étant fait une fois pour toutes à l'atelier, comme les induits de même fabrication présentent des résistances presque rigoureusement égales, on peut être sûr que la charge se partagera également entre les deux moteurs tant qu'il n'y aura pas de glissement d'une des paires de roues ; ces glissements seront, d'autre part, restreints à une très faible valeur par le fait que la moindre augmentation de vitesse d'un des moteurs

[1] On peut achever de les égaliser en introduisant, comme nous l'avons dit ci-dessus, une petite cale dans le joint des moteurs dont le champ magnétique est trop intense.

[2] Cet artifice est ici très simple, tandis qu'il serait difficile, au point de vue pratique, de régler les valeurs relatives des champs de deux moteurs en série.

par rapport à l'autre augmente sa f. é. m. et fait par suite diminuer sa puissance au profit de cet autre. Mais ces précautions sont une assez grande sujétion. D'autre part, si l'on n'a pas réalisé cette égalisation préalable du champ, l'excitation en dérivation, ne produisant entre les deux moteurs aucune compensation automatique, pourra donner de très mauvais résultats. C'est une cause d'infériorité pour ce mode d'enroulement.

Si l'on suppose les champs des moteurs réglés à l'égalité et les vitesses maintenues égales, les propriétés respectives des deux couplages en série *c* et en dérivation *d* restent les mêmes que pour les moteurs en série et ne demandent pas d'autre explication.

Quant au couplage en série suivant le schéma *b*, il ne peut être employé, parce que, dans le cas où l'un des moteurs se mettrait à tourner plus vite que l'autre par suite d'un patinage des roues de l'essieu correspondant, il réduirait la f. é. m. disponible aux bornes du second et pourrait annuler l'excitation de celui-ci. On doit donc remplacer ce groupement par le couplage *c*, où les inducteurs sont *excités à part* (en série ou en parallèle) par une dérivation prise sur le réseau ou sur une source locale d'électricité, c'est-à-dire qu'on ne peut employer le système du groupement en série avec des moteurs à excitation dérivée que si l'on emploie une excitation indépendante ; les deux champs sont alors forcément constants et sensiblement égaux.

Les mêmes conclusions s'appliquent à l'excitation indépendante. Le mieux, dans ce cas, sera d'affecter aux deux moteurs une batterie qui excite leurs inducteurs d'une manière indépendante du groupement des induits.

Accouplement d'un nombre de moteurs supérieur à deux. — On emploie aujourd'hui dans d'assez nombreux cas, notamment sur des automobiles de chemins de fer et des locomotives électriques, des groupes de 4 moteurs. Les deux bogies des locomotives Heilmann sont chacun à 4 moteurs, et le train automoteur proposé autrefois par le même inventeur comportait une paire de moteurs par wagon. Avant lui, M. F. J. Sprague avait proposé l'emploi de trains formés entièrement d'automobiles, et ce système est aujourd'hui appliqué avec succès sur le South Side Elevated

R. R. de Chicago (voir p. 263); il le sera bientôt aussi en France sur la ligne du Fayet à Chamonix (p. 261).

Le nombre des combinaisons réalisables augmente en même temps que celui des moteurs. Par exemple, avec 4 moteurs, on peut réaliser les 3 combinaisons représentées par la figure 544; avec 6 moteurs, on aurait 4 combinaisons, etc.; mais on recule en général devant cette complication; nous reviendrons d'ailleurs sur ces dispositifs au chapitre suivant, pour en montrer l'application à la régulation de vitesse. Les propriétés de ces groupements multiples restent semblables à celles des groupements de 2 moteurs : les moteurs excités en série peuvent être groupés d'une manière quelconque, à condition de ne pas séparer dans chacun l'induit et l'inducteur; au contraire, les moteurs excités en dérivation ne

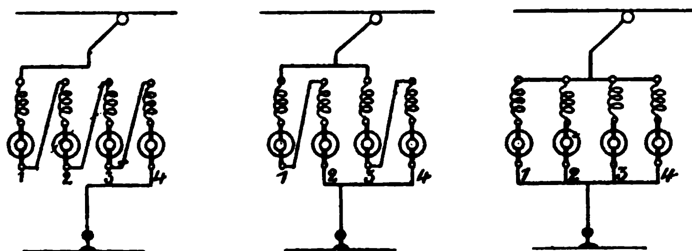


Fig. 544. — Groupements réalisables avec quatre moteurs excités en série.

peuvent être groupés en série qu'à la condition d'être excités indépendamment. En pratique, au lieu d'employer toutes les combinaisons possibles, on se contente souvent, pour simplifier, de laisser les appareils en parallèle.

L'influence du mode de couplage des moteurs sur l'adhérence, qui sera étudiée avec détails au chapitre XIII, peut du reste faire préférer ce dispositif sur les lignes à fortes rampes ou à démarrages fréquents.

Régimes des moteurs accouplés. — Lorsque plusieurs moteurs semblables sont accouplés en parallèle, les vitesses et les couples moteurs, qui ne dépendent que du courant, sont les mêmes pour chaque moteur que s'il fonctionnait isolément.

Pour des moteurs groupés en série, les couples sont égaux entre eux pour le même motif, mais les vitesses sont modifiées; ces modifications ne sont qu'un cas particulier du cas général étudié plus haut de l'alimentation sous différents voltages (p. 110).

Soit n le nombre de tours par minute d'un moteur isolé correspondant au régime de courant I. Supposons qu'on mette en série m moteurs bien semblables, en conservant le même courant et la même différence de potentiel totale. Le flux de chacun restera le même, ainsi que le couple. Le couple total sera multiplié par m, tandis que la vitesse de chaque moteur sera réduite dans le rapport des forces électromotrices induites. Celles-ci sont égales à la différence de potentiel aux bornes de chaque moteur diminuée du voltage perdu par la résistance de l'induit. Dans le premier cas, en appelant r la résistance intérieure de chaque moteur, on a

$$E = U - rI = Nn\,\Phi;$$

dans le second,

$$E' = \frac{U}{m} - rI = Nn'\,\Phi;$$

d'où l'on tire pour le rapport des vitesses

$$\frac{n'}{n} = \frac{1}{m}\left(\frac{U - mrI}{U - rI}\right).$$

La vitesse des moteurs groupés en série est donc réduite plus que dans le rapport $1/m$ et la réduction croît avec la charge.

Dès qu'on connaît la courbe de vitesse d'un moteur employé à un certain voltage, la dernière formule permet d'en déduire la courbe correspondant au cas de deux ou plusieurs moteurs semblables en série. Les figures 518 et 536, et 537, 538 et 539 donnent deux exemples d'une semblable transformation, l'une dans le cas de deux moteurs de tramways de 20 kilowatts, l'autre dans le cas de quatre moteurs de chemins de fer de 75 kilowatts. Les ordonnées de la courbe 536 ont été déduites, par exemple, de celles de la courbe 518 en les réduisant dans le rapport $\frac{250 - 1{,}60 \times I}{500 - 1{,}60 \times I}$ variable avec l'abscisse I, la résistance intérieure totale r étant supposée de 1,6 ohm.

Le couple restant constant pour chaque moteur d'une série, la puissance utile de chacun est réduite par rapport à ce qu'elle serait s'il était seul dans la même proportion que la vitesse, tandis que la puissance dépensée est réduite dans le rapport $1/m$. Le rendement de chaque moteur sous le courant I est donc réduit par le couplage dans le rapport

$$\frac{mn'}{n} = \frac{U - mrI}{U - rI};$$

il s'abaisse plus vite aux charges croissantes et cet effet est d'autant plus marqué que les moteurs groupés sont plus nombreux.

Nous retrouverons ces courbes plus loin (p. 150), lors de l'étude de la régulation de vitesse par la méthode des couplages variables.

CHAPITRE X

RÉGULATION DE LA VITESSE DES VOITURES

Objet de la régulation. — Le but théorique d'un système de régulation est de permettre de réaliser à volonté, pour chaque valeur de l'effort, une vitesse quelconque, depuis la plus réduite jusqu'à la vitesse maxima compatible avec la sécurité de l'exploitation et la puissance des moteurs ; réciproquement, il doit permettre de conserver une même vitesse pour toutes les valeurs de l'effort ; enfin, accessoirement, il doit assurer un bon démarrage, rapide et sans secousse.

Mais, en pratique, il n'y a pas d'intérêt absolu à réaliser toutes les vitesses sous tous les efforts possibles, et il suffit d'obtenir un certain nombre de courbes de vitesse s'étendant entre des limites assez larges.

Il est essentiel, en outre, de remarquer qu'on peut se proposer dans une régulation de vitesse deux objets très différents, que nous avons déjà signalés à propos de l'excitation des moteurs (voir p. 99 et 102).

Si l'on se place au point de vue de la rapidité des transports et de l'intérêt du public, on doit chercher à maintenir la vitesse aussi constante que possible sur tout le parcours, indépendamment des variations d'effort qu'entraînent les changements de déclivité, de façon à réaliser la plus grande vitesse commerciale possible sans dépasser la limite fixée.

Au contraire, si l'on se place au point de vue du bon fonctionnement des moteurs et de la station génératrice, on doit, pour réduire leur puissance au minimum et en tirer le meilleur parti possible, chercher à maintenir à peu près constante la puissance

consommée par chaque voiture. Le travail mécanique correspondant étant proportionnel au produit de l'effort par la vitesse, il serait rationnel, avec ce but en vue, de faire varier l'un en raison inverse de l'autre ; mais on est très limité dans cette voie, car il serait peu compatible avec la bonne marche de l'exploitation de réduire la vitesse du simple au tiers ou au quart[1] quand on passe d'un palier à une rampe de 2 ou de 3 p. 100. On doit donc se contenter d'une approximation, en uniformisant la puissance le plus possible dans les limites de vitesse compatibles avec les exigences de l'exploitation.

Conditions pratiques d'une bonne régulation. — Pour remplir l'un ou l'autre de ces desiderata d'une manière satisfaisante, il faut réaliser en outre trois conditions pratiques d'ordre différent, mais également importantes :

1° Prévenir tout à-coup brusque dans les changements de vitesse produits par le régulateur, et par conséquent *graduer* les vitesses avec autant de continuité que possible;

2° Réduire au minimum les pertes d'énergie occasionnées par les organes régulateurs et éviter par suite autant que possible l'emploi de rhéostats aux régimes les plus usités;

3° Empêcher tout échauffement exagéré des enroulements, la production d'étincelles au collecteur et toute autre cause de détérioration pour les moteurs et les appareils de manœuvre, en s'opposant à toute augmentation excessive de courant dans les manœuvres.

Dans ce qui suit, nous examinerons successivement les méthodes et les appareils qui permettent de réaliser ces diverses conditions, puis nous en donnerons des exemples variés.

§ 1. — Méthodes de régulation

Principe des méthodes employées. — Si l'on se reporte aux règles fondamentales qui régissent les variations du couple et de la vitesse (p. 70), on voit immédiatement, d'après l'équation

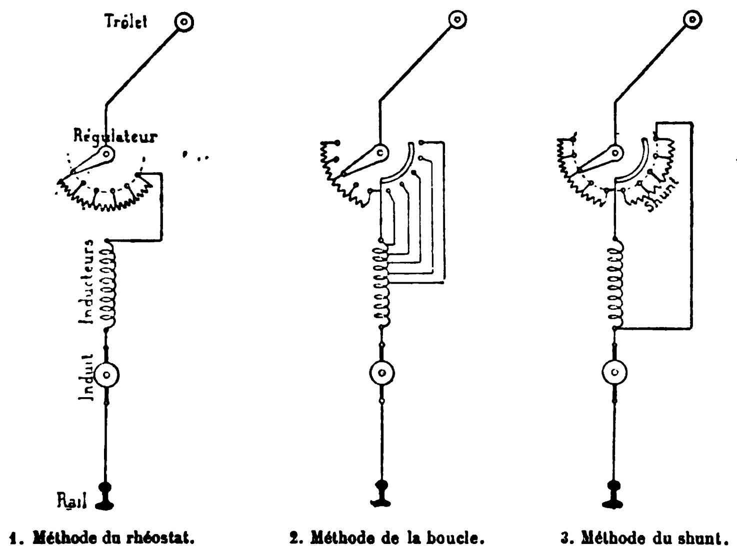
[1] La résistance en palier étant supposée sensiblement égale à la résistance due à la gravité sur une rampe de 1 p. 100.

approchée (14 *bis*), que la vitesse d'un moteur exerçant un couple donné peut être modifiée en agissant sur l'un des trois facteurs suivants :

1° Le voltage aux bornes, auquel elle est sensiblement proportionnelle : on fait varier celui-ci soit en modifiant le voltage de la source d'électricité, soit en intercalant un rhéostat entre la ligne et le moteur (fig. 545 et 548) ;

2° Le flux inducteur, auquel elle est inversement proportionnelle : on peut faire varier ce flux, par exemple, en modifiant le nombre de spires inductrices (fig. 546 et 549), par les procédés indiqués plus loin, ou en les shuntant par des résistances (fig. 547) ;

3° Le nombre de spires de l'induit, qu'on peut modifier en



1. Méthode du rhéostat. 2. Méthode de la boucle. 3. Méthode du shunt.

Fig. 545, 546 et 547. — Schémas de trois méthodes de régulation d'un moteur excité en série.

répartissant l'enroulement en circuits distincts munis de collecteurs séparés.

On dispose donc de trois procédés différents pour régler la vitesse d'un moteur isolé ; ceux-ci peuvent aussi être combinés entre eux, comme c'est le cas pour les dispositifs 2 et 3, où l'on emploie d'abord un rhéostat en série.

Lorsqu'il y a plusieurs moteurs par véhicule ou par train, on

peut encore appliquer les mêmes méthodes ; mais on dispose en outre d'un autre procédé consistant à les accoupler tantôt en série et tantôt en parallèle, ainsi qu'on l'a vu plus haut[1].

Nous allons indiquer rapidement en quoi consistent ces différentes méthodes, en suivant l'ordre dans lequel elles se présentent chronologiquement, qui est aussi celui de leurs progrès successifs. Nous supposerons d'abord qu'il s'agit d'un réseau alimenté à potentiel constant et nous réserverons pour un paragraphe spécial les méthodes où l'on fait varier la tension aux bornes. Nous rejetterons en outre à la fin de ce chapitre, pour éviter toute confusion, l'examen des méthodes applicables à des voitures alimentées en série à courant constant pour le cas où ce genre de distribution serait employé ; ces méthodes sont d'ailleurs les mêmes que pour les moteurs en série à potentiel constant, mais la façon de les appliquer est forcément différente. Dans ce qui suit, nous traiterons à la fois le cas du moteur en série et celui du moteur en dérivation, mais en faisant porter nos exemples numériques de préférence sur le premier, qui est le plus employé.

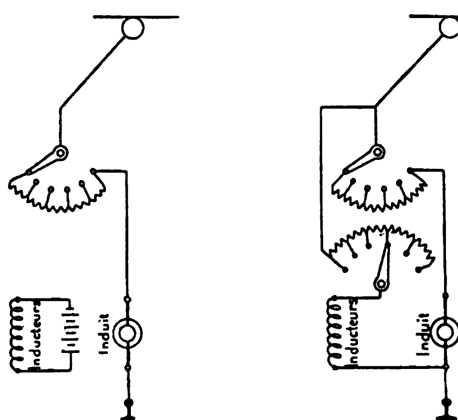


Fig. 548 et 549. — Schémas des méthodes analogues pour moteurs excités en dérivation.

I. — Régulation a potentiel constant

A. Variation du voltage aux bornes, méthode du rhéostat. — Le moyen le plus naturel et le plus anciennement connu dont on dispose sur les réseaux alimentés à potentiel constant pour abaisser le voltage aux bornes d'un moteur consiste à intercaler

[1] Cette méthode rentre au fond dans la première, car placer en série deux moteurs, d'abord mis en parallèle, revient au même que d'abaisser de moitié la tension aux bornes de chacun.

sur le circuit de l'induit, comme nous venons de le dire, une résistance variable formée d'un rhéostat convenablement choisi pour pouvoir supporter le courant sans échauffement dangereux. Soient r_i la résistance des inducteurs, r_a celle de l'induit, R celle du rhéostat, i_a le courant de l'armature, qui dans un moteur en série est le courant total I, U le voltage du réseau; la différence de potentiel aux balais est :

$$\text{Moteur en série, } u = U - (R + r_i)\, I;$$

$$\text{Moteur en dérivation, } u = U - R i_a.$$

En faisant varier R, on peut régler la valeur de u dans des limites très étendues. Si l'on applique ce procédé à un moteur ayant à vaincre un effort résistant sensiblement constant aux différentes vitesses ordinaires, le courant et par suite le flux inducteur resteront sensiblement les mêmes (voir le chapitre IX), quelle que soit la résistance intercalée; la vitesse seule sera modifiée[1] à peu près proportionnellement à u, d'après la formule (14) qui donne en négligeant, pour simplifier, la réaction d'induit :

$$\text{Moteur en série, } n = \frac{u - r_a i_a}{N\Phi} = \frac{U - (R + r_a + r_i)\, I}{N\Phi}, \qquad (43)$$

$$\text{Moteur en dérivation, } n = \frac{U - (R + r_a)\, i_a}{N\Phi} \qquad (43\ bis)$$

On remarquera que ce système permet de réduire la vitesse à partir de la valeur normale, mais non de l'augmenter, car on ne peut admettre une résistance restant constamment en circuit.

Le réglage par rhéostat est le plus simple de tous et n'exige aucun appareil compliqué; il permet de graduer la vitesse avec une grande douceur, par l'emploi de résistances variables suivant une progression lente. Malheureusement, il entraîne une perte d'énergie (RI^2) absolument improductive et d'autant plus grande qu'on réduit la vitesse davantage; cette perte a en outre pour corollaire un échauffement intense du rhéostat parcouru par le courant et il faut prendre des précautions particulières pour construire et loger cet appareil, qui est souvent très encombrant.

[1] Cependant, si la résistance de l'air a un effet sensible sur le coefficient de traction, le courant consommé par une voiture sur une déclivité donnée diminuera légèrement en même temps que la vitesse.

Régimes d'un moteur muni d'une résistance en série avec l'induit. — Voyons, pour préciser notre étude de ce mode de régulation, comment se comporte, lorsqu'on lui ajoute une résistance fixe, un moteur défini par ses courbes de fonctionnement en fonction du courant à l'état naturel.

1° Pour un moteur en dérivation, comme le flux inducteur ne dépend pas du courant, le couple moteur restera représenté par la même courbe qu'avant l'addition de la résistance R ; la vitesse V seule variera proportionnellement à la f. é. m. induite au régime de même courant, c'est-à-dire qu'on aura, en appelant V′ la nouvelle vitesse,

$$\frac{V'}{V} = \frac{E'}{E} = \frac{U - (R + r_a)\, i_a}{U - r_a i_a} = 1 - \frac{R i_a}{U - r_a i_a}. \qquad (44)$$

En réduisant chaque ordonnée dans ce rapport, on obtiendra la courbe cherchée[1].

2° Pour un moteur en série, le couple est constant sous un régime de courant donné ; la courbe de couple n'est donc pas modifiée non plus par l'addition d'une résistance. Quant à la vitesse, elle varie un peu différemment, parce que la résistance des inducteurs s'ajoute à celle de l'induit r_a ; on a donc, pour chaque valeur du courant, à modifier l'ordonnée dans le rapport

$$\frac{V'}{V} = 1 - \frac{RI}{U - (r_a + r_i)\, I}. \qquad (45)$$

Quel que soit le type d'excitation, la puissance utile se trouve, à courant égal, réduite dans le même rapport $\frac{V'}{V}$ que la vitesse. Il en est de même du rendement, puisque la dépense d'énergie est la même.

Les courbes de vitesse obtenues pour des valeurs croissantes de R iront donc en tombant de plus en plus vite vers la droite (fig. 550) et formeront un faisceau en éventail, divergeant d'un point commun situé sur l'ordonnée à l'origine ($I = 0$). Pour une même valeur OV de la vitesse, on pourra donc réaliser plusieurs efforts, sensiblement proportionnels aux courants Vb, Vb′, Vb″, Vb‴ ; inversement, sous un courant OA constant, c'est-à-dire sous un effort constant, on réalisera plusieurs vitesses différentes An, Ap, etc. En prenant un nombre suffisant de résistances différentes, on pourra, comme le montrent les parties des courbes tracées en traits forts, passer de la charge la plus grande demandée OC à la plus petite OD, sans que la vitesse sorte de deux limites rapprochées V_1 et V_2. C'est ainsi qu'on réalise pratiquement la vitesse constante.

Cette méthode ne permet pas d'uniformiser la dépense d'énergie à charge variable mieux que le fonctionnement naturel du moteur seul, puisque la réduction de vitesse ainsi réalisée sous une charge donnée n'est accompagnée d'aucune réduction de courant.

Les courbes de la figure 550, que nous donnons ici à titre d'exemple pra-

[1] On pourrait remplacer le calcul par une construction graphique, mais cela n'en vaut pas la peine, car on arrive plus vite et plus exactement au résultat par la règle à calcul. Cette remarque s'applique aussi à toutes les transformations de courbes que nous indiquerons par la suite.

tique de ces transformations, sont relatives au fonctionnement d'un moteur sur une voiture de tramway équipée avec un ou deux moteurs en parallèle de 20-30 chevaux, excités en série et fonctionnant sur un réseau à 500 volts.

Les données sont, d'une part, les courbes de fonctionnement normal du moteur sans résistance supplémentaire et, d'autre part, les résistances à chaud, que nous supposons les suivantes [1] :

$$r_a = 0{,}9 \text{ ohm (armature)},$$
$$r_i = 0{,}7 \text{ — (inducteur)},$$
$$\text{total } r = 1{,}6 \text{ — }.$$

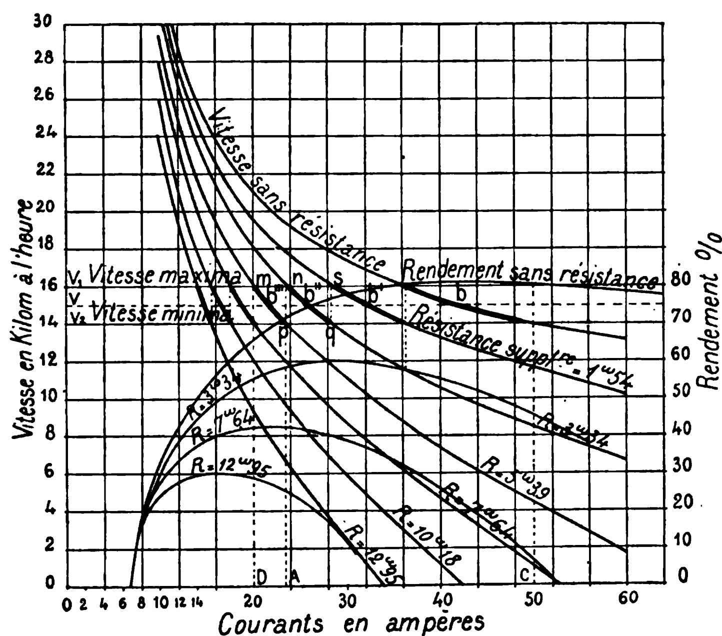


Fig. 550. — Régulation par rhéostat d'un moteur de tramway excité en série. — Courbes de vitesse et de rendement en fonction du courant lorsqu'on met en série successivement 0, 1,54, 3,34, 5,39, 7,64, 10,18 et 12,95 ohms.

Les courbes de puissance utile et de puissance consommée se déduisent des courbes d'effort, de vitesse et de courant par les relations suivantes :

Puissance sur l'essieu : $P_u = F \frac{V}{3,6} \times \frac{9,81}{1000}$ en kilowatts.

Puissance aux bornes : $P_e = 0,500 \times I$ en kilowatts.

D'où le rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_e}$.

[1] Il va sans dire que les échauffements étant toujours très considérables, ces courbes ne s'appliquent qu'à des moyennes. Les valeurs que nous avons adoptées dans cet exemple ont été volontairement un peu forcées pour rendre plus nette la forme des courbes que nous donnerons par la suite.

La puissance P_e reste constante ainsi que l'effort, pour un courant donné, et il a suffi, par suite, de représenter les courbes de vitesse et de rendement.

Quand on se propose de faire un réglage par rhéostat, on doit choisir les résistances de façon que les courbes nouvelles obtenues permettent de réaliser des régimes suffisamment appropriés au service prévu; les transitions ne doivent pas être trop brusques, ce qui exige au minimum quatre ou cinq résistances graduées.

Lorsqu'on veut éviter un calcul plus précis, on peut se contenter de choisir ces résistances de façon qu'au régime moyen, ici par exemple 20 ampères, les vitesses forment des échelons équidistants entre le maximum et le minimum.

La vitesse correspondant à ce régime étant de 21 km : h. sans rhéostat, on réaliserait, par exemple, des vitesses de 9, 12, 15, 18 km : h., égales aux 3, 4, 5, 6 septièmes de la vitesse moyenne sous le même courant, en prenant des résistances telles que $\frac{Ri_a}{U - ri}$ soit successivement égal à 1, 2, 3, 4 septièmes.

D'où

$$R = (1, 2, 3, 4)\,\frac{500 - 20 \times 1,6}{20 \times 7}$$

$$= (1, 2, 3, 4) \times 3,114 \text{ ohm.}$$

Si l'on veut faire un choix plus précis, pour se conformer par exemple à un règlement qui impose une vitesse maxima de 16 km : h. dans l'intérieur d'une ville et de 20 km : h. à l'extérieur, on se donnera les limites entre lesquelles on veut maintenir la vitesse, entre 14 et 50 ampères par moteur, soit par exemple 14 et 16 km : h. en ville, et l'on calculera les résistances nécessaires de façon que les tronçons de courbes de la figure 550 aboutissent exactement aux horizontales limites.

A 16 km : h., chaque moteur seul prend 36 amp.; la première résistance x doit ramener la vitesse à 14 km : h.; on doit donc avoir pour chaque moteur :

$$\frac{14}{16} = 1 - \frac{x \times 36}{500 - 1,6 \times 36};$$

$$x = 1,54 \text{ ohms.}$$

On trace alors la courbe correspondant à cette valeur de R, puis on détermine le point où elle coupe la ligne de 16 km : h. et l'on calcule la nouvelle résistance nécessaire pour ramener, sous le nouveau courant, la vitesse à 14 km : h., et ainsi de suite. On obtient ainsi les valeurs rationnelles des résistances à placer dans le rhéostat. Il va sans dire qu'on peut ensuite les subdiviser par des touches intermédiaires.

Une voiture ainsi équipée répond à la limite de 16 km : h. Les mêmes courbes permettront, du reste, aussi de se rapprocher de la vitesse de 20 km : h. dans la partie où la ligne sort de la ville; il suffira pour cela de marcher avec une résistance moindre et au besoin sans rhéostat.

Il reste à vérifier que la résistance intercalée sera suffisante au moment du démarrage pour prévenir un échauffement exagéré, c'est-à-dire pour empêcher que le courant ne dépasse le double du courant au régime forcé ou le triple du

courant moyen, c'est-à-dire ici 60 ampères; on aura ainsi, pour déterminer la valeur de la résistance maxima x pour chaque moteur, la relation

$$60 \text{ ampères} = \frac{500 \text{ volts}}{(x + 0{,}9 + 0{,}7) \text{ ohms}},$$

d'où

$$x = 6{,}7 \text{ ohms, par moteur.}$$

Les résistances précédentes sont donc bien plus que suffisantes pour satisfaire à cette condition et on les réduira pour démarrer.

B. Variation de l'excitation. — Les moyens à employer étant très différents suivant le genre d'excitation des moteurs, nous examinerons séparément le cas des moteurs shunt et celui des moteurs en série.

1° Moteur excité en dérivation ou séparément, méthode du rhéostat de champ. — Dans le premier cas, on règle l'intensité du courant d'excitation, indépendamment de l'intensité du courant d'armature, à l'aide d'un rhéostat à touches placé dans le circuit des inducteurs et de résistance appropriée (fig. 549).

Les variations de champ qui en résultent font varier cette fois le couple moteur en même temps que la vitesse, et d'une manière assez complexe; car, pour obtenir encore le même couple avec un flux $\Phi' < \Phi$, il faut forcément admettre une valeur plus forte pour le courant d'armature i_a. L'expression $C_u = \frac{N\Phi\, i_a}{2\pi} - C_p$ (p. 85) montre qu'il faudra maintenir le produit Φi_a sensiblement constant.

L'expression de la vitesse déduite de la formule (14) (en négligeant toujours la faible réaction d'induit),

$$n = \frac{i_a}{2\pi\,(C_u + C_p)}\,(U - r_a i_a),$$

montre, si l'on suppose négligeables les petites variations du couple de pertes C_p, que la vitesse obtenue, à couple utile constant, variera en fonction du courant suivant une loi sensiblement parabolique, mais seulement croissante dans les limites d'emploi[1].

A titre d'exemple, la figure 551 donne la courbe obtenue sous l'effort constant de 250 kg. pour le moteur étudié plus haut (p. 113).

[1] Le maximum est en effet atteint pour un courant $i_a = \frac{U}{2\,r_a}$, égal à la moitié de l'intensité en court-circuit sans excitation, c'est-à-dire plus élevé que ne le permet la conservation du moteur.

Soient i_0 le courant et n_0 la vitesse correspondant à cet effort sur la courbe de la figure 541 ; lorsqu'on fait varier l'excitation, les nouvelles vitesses n sont données en fonction des intensités nouvelles i_a par l'équation

$$\frac{n}{n_0} = \frac{i_a}{i_0} \frac{U - r_a i_a}{U - r_a i_0}; \qquad (46)$$

le flux Φ étant inversement proportionnel au courant i_s, on en

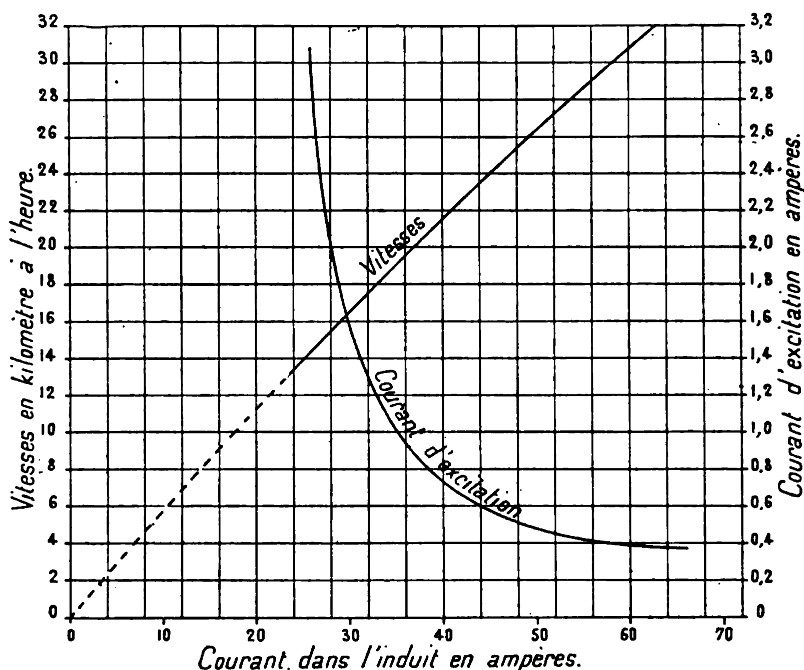


Fig. 551. — Variations de vitesse à effort constant obtenues par des variations de l'excitation d'un moteur excité en dérivation ; ce moteur est défini par les courbes des figures 540 et 541 (p. 113 et 114). Les vitesses et les courants d'excitation sont rapportés aux courants dans l'armature ; l'effort résistant à la jante est supposé constamment égal à 250 kg.

déduit par la courbe d'excitation (fig. 540) les valeurs correspondantes à donner au courant inducteur.

Aux faibles charges, on peut accroître ainsi la vitesse dans de très grandes limites, parce que la réaction d'induit est négligeable ; mais, à pleine charge, les étincelles ne permettent pas en général d'abaisser le champ de plus de 50 p. 100, ce qui entraîne le dou-

blement du courant ; le rapport extrême des vitesses réalisables, à couple constant, d'après l'équation (46), sera alors sensiblement

$$\frac{n'}{n} = 2 \frac{\frac{U}{r_a} - 2i_a}{\frac{U}{r_a} - i_a} \tag{47}$$

c'est-à-dire voisin de 2; cette limite ne peut même être atteinte

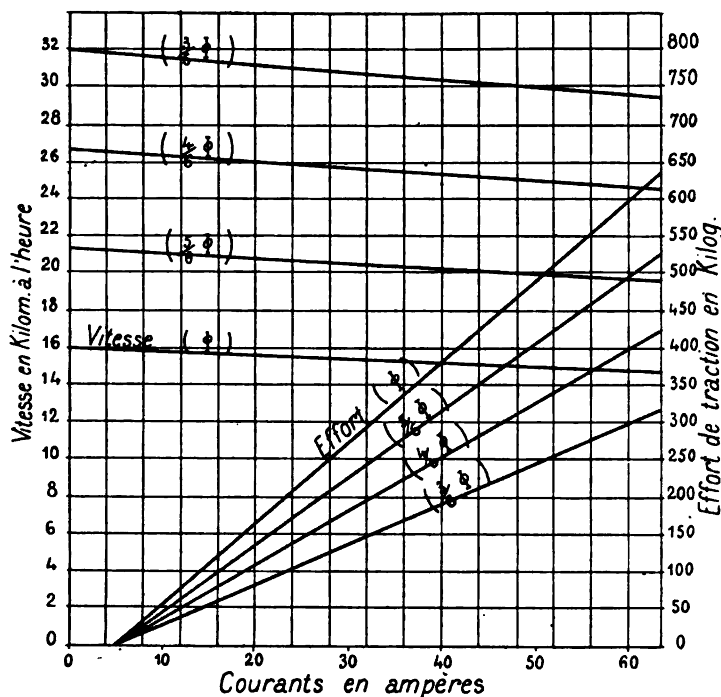


Fig. 552. — Variations de vitesse et de couple obtenues sur le moteur en dérivation défini par la figure 541 (p. 114), lorsqu'on réduit son flux inducteur Φ aux 5, 4 et 3 sixièmes de sa valeur primitive.

au régime forcé, de sorte qu'en général il ne faut pas compter pouvoir accroître la vitesse de plus de 50 p. 100 de sa valeur inférieure.

Ce mode de régulation peut permettre non seulement d'augmenter la vitesse, mais aussi de la diminuer, si l'on a soin de prendre pour le régime normal une excitation moyenne assez éloignée de la saturation. Il se prête naturellement à la régulation à vitesse constante, puisque, pour toutes valeurs de l'excitation, le

moteur à excitation dérivée ou séparée est auto-régulateur de vitesse ; mais il permet en outre la régulation à puissance uniformisée, car on peut affaiblir le champ aux faibles charges et le renforcer au contraire aux fortes charges de façon à maintenir le courant à peu près uniforme dans ces mêmes limites.

Si l'on se donne les vitesses admissibles pour le plus petit et pour le plus grand couple moteur, l'expression (47) donnera immédiatement les limites correspondantes pour i_a.

Régimes d'un moteur shunt sous des excitations variables. — Les courbes de vitesse d'un moteur shunt pour diverses excitations ont leurs ordonnées simplement proportionnelles entre elles, en vertu de l'équation (14), où l'on néglige ε (p. 70),

$$n = \frac{U - r_a i_a}{N\Phi}; \quad (14)$$

on voit, en effet, que, pour une même valeur du courant i_a, n est inversement proportionnel à Φ.

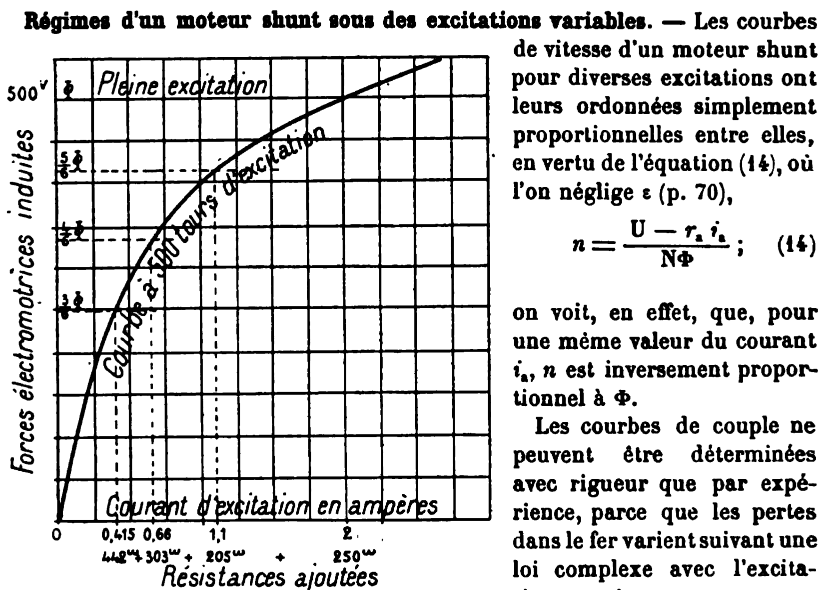


Fig. 553. — Détermination des courants d'excitation et des résistances à ajouter au circuit des inducteurs pour réduire le flux aux 5, 4 et 3 sixièmes de sa valeur primitive.

Les courbes de couple ne peuvent être déterminées avec rigueur que par expérience, parce que les pertes dans le fer varient suivant une loi complexe avec l'excitation ; mais on peut, sans grande erreur, négliger leur variation à côté des autres pertes, d'autant plus que la réduction de l'excitation augmente le courant nécessaire pour vaincre les autres résistances passives.

Si l'on néglige, pour ce motif, les variations du courant de pertes i_0, les ordonnées des lignes de couple seront proportionnelles entre elles[1].

La courbe d'excitation permet de calculer les résistances du rhéostat à intercaler pour obtenir chacun des flux considérés.

A titre d'exemple, la figure 552 représente les courbes de régime obtenues pour le moteur de la figure 541 (p. 114) lorsqu'on réduit son flux d'excitation

[1] Les courbes relatives à l'excitation normale peuvent représenter approximativement le fonctionnement sous des excitations différentes, à la seule condition d'amplifier les échelles en proportion inverse des flux pour les couples et proportionnellement aux flux pour les vitesses.

successivement aux 5, 4 et 3 sixièmes de la valeur primitive. Ce moteur est excité en dérivation par un enroulement de résistance 250 ohms, parcouru normalement par un courant de 2 ampères, et la courbe d'excitation est donnée par la figure 553.

Celle-ci donne immédiatement pour valeur du courant d'excitation aux trois régimes nouveaux : 1,10, 0,66 et 0,415 ampères.

Les résistances totales correspondantes de la dérivation doivent être 950 + 250, 508 + 250 et 205 + 250.

Le rhéostat devra donc comprendre 4 résistances représentées par le schéma :

Inducteurs 250 ohms + 205 ohms + 303 ohms + 442 ohms.

2° *Moteur excité en série, méthode de commutation ou de shuntage des bobines de champ.* — On dispose de deux procédés pour faire varier l'excitation d'un moteur en série sans modifier le courant total qui le traverse.

a). On peut intercaler en dérivation entre les bornes des inducteurs (fig. 547) un rhéostat de shunt variable, à travers lequel passe une fraction plus ou moins importante du courant total d'armature i_a.

Si l'on appelle M le nombre des spires inductrices, S la résistance du shunt et r_1 celle des inducteurs, le nombre des ampères-tours sera réduit à la valeur

$$M \frac{S}{S + r_1} i_a,$$

au lieu de

$$Mi_a.$$

On peut donc le faire varier autant qu'on le veut sans modifier i_a. Au fur et à mesure qu'on diminue la résistance du shunt S, le courant diminue dans les inducteurs, et, en même temps, la résistance totale offerte au passage du courant entre les bornes va également en décroissant.

b). On peut aussi découper l'enroulement inducteur en plusieurs « galettes » indépendantes, dont on supprime ou intervertit à volonté un nombre variable. Cette méthode a été imaginée par *Reckenzaun* et appliquée sur une grande échelle en Amérique par M. *F.-J. Sprague* jusqu'en 1890.

Le dispositif de *van Depoele* (fig. 546), qui consiste à supprimer des spires et qui s'appelait « méthode de la boucle », a été abandonné parce qu'il utilisait mal le cuivre de l'enroulement inducteur aux forts régimes. On préfère aujourd'hui faire passer toujours le cou-

rant dans tout l'enroulement, en combinant, suivant différents groupements, les galettes entre lesquelles il est divisé.

La figure 554 représente, par exemple, la disposition d'un enroulement à 3 galettes pour un moteur bipolaire, type Sprague, et la figure 555 indique schématiquement les divers modes de groupement qu'on peut, à l'aide des commutateurs étudiés plus loin, donner à ces 3 galettes sur le circuit principal allant à l'armature.

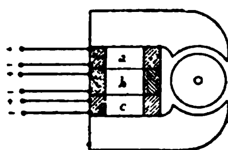


Fig. 554. — Schéma d'un moteur bipolaire à inducteur divisé en trois galettes.

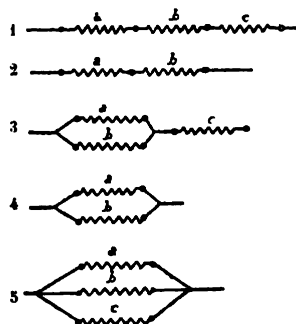


Fig. 555. — Combinaisons principales des trois galettes.

Pour la commodité des réparations, il est bon de former chaque galette d'une bobine séparée.

Si l'on appelle m le nombre de spires et r la résistance de chacune des galettes, supposées égales pour simplifier, et qu'on suppose le courant d'armature constant dans tous les cas, les nombres d'ampères-tours inducteurs et les résistances de l'enroulement dans les combinaisons (1), (2), (3), (4) et (5) seront respectivement donnés par le tableau suivant, où nous avons ajouté sous la rubrique (3 *bis*) le cas d'une seule galette prise isolément :

Combinaison.	Ampères-tours.	Résistance de l'enroulement.
1	$3\,mi_a$	$3\,r$
2	$2\,mi_a$	$2\,r$
3	$2\,mi_a$	$\frac{3\,r}{2}$
3 *bis*	mi_a	r
4	mi_a	$\frac{r}{2}$
5	mi_a	$\frac{r}{3}$

On voit qu'en même temps que l'excitation diminue, la résistance de l'enroulement décroît. La combinaison (3 *bis*) n'est pas employée en général, parce qu'elle ne donne pas assez de spires ou de section de cuivre. En outre, on choisit souvent des résistances et des nombres de spires inégaux pour les différentes galettes[1].

Au lieu de diviser les inducteurs en galettes qui entraînent une complication sérieuse de construction, on peut arriver au même résultat plus simplement en faisant subir des groupements variables aux diverses bobines d'inducteurs ordinaires. Les moteurs de traction étant habituellement à 4 pôles, on peut grouper leurs bobines, soit par 4 en série, soit par 2 séries de 2 en parallèle, soit enfin par 4 en parallèle, et faire ainsi varier les nombres de tours inducteurs dans la proportion 1 : 2 : 4, tandis qu'avec la méthode Sprague à 3 galettes il faudrait dans les mêmes conditions 12 galettes; il suffit le plus souvent de faire une variation dans le rapport de 1 à 2, en groupant les bobines en deux paires qu'on met tantôt en série et tantôt en parallèle.

Un autre procédé plus original qui a été proposé par divers auteurs européens et américains, consiste à constituer chaque pôle inducteur de plusieurs parties excitées séparément. Par exemple, chaque pôle peut être formé de 3 pièces polaires excitées chacune par une bobine; lorsqu'on veut réaliser le champ maximum, on envoie le courant inducteur dans les 3 bobines de façon qu'elles produisent des flux magnétiques concordants; pour réduire le champ aux 2/3 de sa valeur, il suffit de supprimer le courant dans la bobine centrale de chaque pôle; enfin, en inversant le courant dans cette bobine, on réduit la force électromotrice au tiers de sa valeur primitive. Dans les trois

[1] Le rapport des résistances des trois galettes a varié depuis l'origine. Le tableau suivant donne une idée de leurs valeurs pour des moteurs de tramways de 15 chevaux :

TYPE DE MOTEUR	SPRAGUE (ancien type)	EDISON-SPRAGUE (de la ligne de Fiesole).	FIVES-LILLE actuel V. N. B. 125.
	Ohms.	Ohms.	Ohms.
Galette *a*.	2,56	2,54	2,69
— *b*.	3,00	3,25	2,39
— *c*.	1,86	1,77	2,16
Induit	»	0,69	0,82
Résistance de démarrage	5,00	7,00	»

On voit qu'aujourd'hui on fait les trois galettes sensiblement égales.

dispositions, la commutation peut se faire sans étincelles, grâce au fait que l'excitation des pièces polaires extrêmes et par suite le champ sous les cornes polaires restent les mêmes.

Cette méthode s'applique indifféremment aux moteurs excités en série ou en dérivation. Son inconvénient, c'est qu'elle devient trop compliquée dès qu'on emploie plus de deux pôles, chiffre aujourd'hui exceptionnel dans la traction.

On a proposé aussi, pour les moteurs à 4 pôles avec bobinage d'induit en série, de supprimer à un moment donné l'excitation de deux des pôles, pour doubler la vitesse par réduction de moitié sur la force électromotrice; mais cette disposition est loin d'assurer aussi bien la commutation que la précédente et elle a, en outre, le très grand inconvénient de soumettre l'armature à des efforts dissymétriques si l'on conserve deux pôles adjacents actifs.

Les effets des deux procédés *a* et *b* sont absolument analogues. Le système Sprague a l'inconvénient d'une certaine complication; on ne peut guère employer plus de 3 galettes. Au contraire, le shunt permet un nombre quelconque de régimes. Dans les deux cas, la variation du nombre des ampères-tours tend à modifier à la fois le flux inducteur et la résistance des inducteurs. Ces modifications tendent *toutes deux* à faire varier dans le même sens la vitesse de rotation, et par conséquent le réglage est possible par cette méthode. Il reste à voir dans quelle mesure et quelle proportion on peut profiter de chacun des deux effets.

Suivant le nombre de spires placées sur les inducteurs, on peut se rapprocher de l'un ou l'autre des deux types de régulation mentionnés plus haut, la régulation à puissance uniformisée ou la régulation à vitesse constante.

La réalisation de la première exige seulement que, dans aucune des combinaisons, le courant maximum fourni à l'excitation ne produise plus qu'un commencement de saturation; le moteur se comporte alors dans tous les cas comme ceux que nous avons étudiés à un seul régime à la page 93.

La seconde s'obtiendra en mettant assez de spires pour que, dès la faible charge, le courant suffise à saturer les inducteurs dans la position 1 des bobines (toutes en série); il en sera de même pour les autres combinaisons si l'on maintient la densité du courant à peu près constante, par exemple en se mettant à la position 2 quand le courant a doublé et à la position 4 quand il a triplé. Dans ces conditions, on doit renoncer à toute influence sérieuse

du flux inducteur sur la régulation jusqu'à la vitesse normale et compter uniquement sur la variation du voltage aux balais produite par les modifications de résistance des inducteurs.

A l'aide de ces modifications, on peut, si on le désire, ramener le voltage aux balais à une valeur presque toujours la même, malgré des variations très grandes du courant, ce qui permet de réaliser pour des efforts de traction très différents une vitesse à peu près constante. Le rendement seul va en diminuant aux faibles charges à cause de la résistance plus grande intercalée ; la

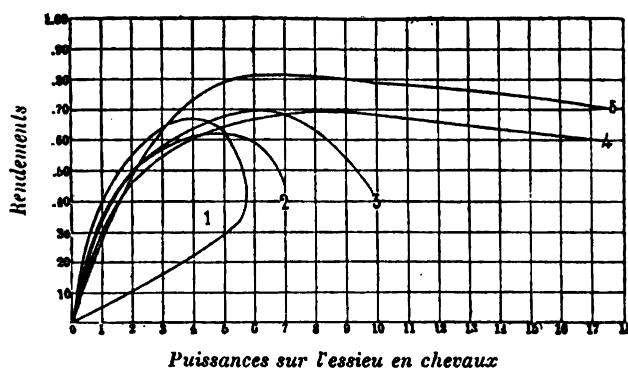


Fig. 556. — Courbes de rendement d'un moteur Sprague n° 1 aux différentes combinaisons de galettes indiquées par la figure 555.

figure 556, relative à un moteur Sprague à double réduction n° 1 de 15 chev., en fournit un exemple très net. En outre, l'échauffement reste à peu près le même à toute charge.

A partir du moment où le champ est saturé, le réglage par variation d'excitation n'est plus au fond qu'une forme détournée de la méthode du rhéostat, ce dernier étant constitué dans le cas particulier par les inducteurs eux-mêmes. Tout se passe comme si l'on avait affaire à un moteur à excitation indépendante dans le circuit d'armature duquel on introduirait des résistances variables. La véritable différence, c'est que l'augmentation de la perte d'énergie dans les bobines est accompagnée d'un effet utile, l'accroissement du champ, tandis que dans un rhéostat en série elle est toujours stérile.

Cette méthode a permis de réaliser d'assez bons rendements aux divers régimes de vitesse et de charge. La figure 556, résultant

des essais de MM. H. S. Hering et W. S. Aldrich[1] sur un moteur Sprague à 3 galettes du Neversink Mountain R. R., montre, par exemple, comment varient les rendements pour chacune des 5 combinaisons de bobines indiquées ci-dessus et rappelées ici par leurs numéros correspondant à ceux de la figure 555. On voit que les 4 premières combinaisons permettent de réaliser successivement un rendement sensiblement le même et égal à 70 p. 100, et que la dernière (toutes les bobines en quantité) permet de réaliser dans de très grandes limites de puissance un rendement de 70 à 80 p. 100.

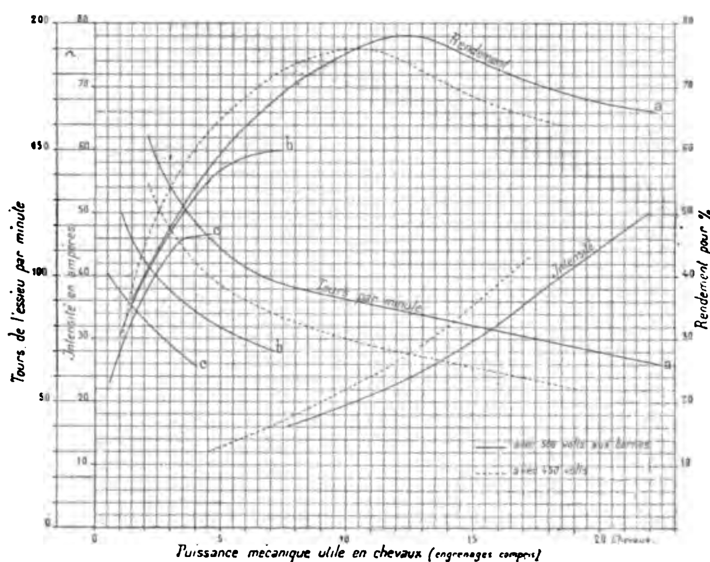


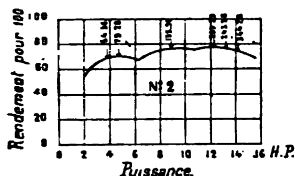
Fig. 557. — Courbes de rendement du moteur V. N. B. 125 de la Cie de Fives-Lille dans trois positions du régulateur correspondant aux combinaisons 1, 3 et 5 de la figure 555.

Les courbes de la figure 557, relevées sur un moteur de 15 chev. à simple réduction de la Compagnie de Fives-Lille, donnent des résultats analogues. L'efficacité du système se trouve ainsi établie. Mais on peut obtenir des résultats meilleurs encore : par exemple, avec des moteurs à simple réduction de la Compagnie Edison, M. Parshall a trouvé les rendements plus élevés qu'indiquent les courbes des figures 558 et 559 ; celles-ci montrent en même temps dans quelles limites on doit employer chacune des combinaisons de

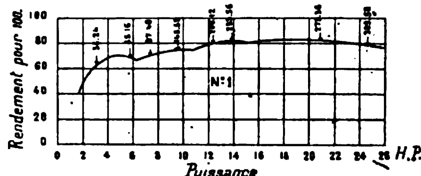
[1] *Electrical World*, mai, juin et juillet 1892.

bobines pour faire toujours fonctionner le moteur dans de bonnes conditions de rendement.

A ce point de vue, le système du shunt est moins complètement satisfaisant que celui de la commutation, parce qu'il donne lieu encore à une certaine perte d'énergie stérile. Mais celle-ci ne dépasse pas en général 2 p. 100 de la puissance normale; elle est



Moteur de 15 chevaux.



Moteur de 25 chevaux.

Fig. 558 et 559. — Rendement en fonction de la puissance de deux moteurs Edison-Sprague de 15 et 25 chevaux respectivement, munis de la régulation Sprague, dans les portions utiles des caractéristiques. Les chiffres ajoutés indiquent les efforts en kg. à la jante de roues de 0,84 m.

donc pratiquement négligeable et l'extrême simplicité du procédé le rend préférable au système Sprague.

Régimes d'un moteur en série à excitation variée. — Les courbes de fonctionnement d'un moteur en série dont on shunte les inducteurs ou dont on commute les bobines de champ, peuvent se déduire des courbes relatives au même moteur à l'état normal par des transformations fort simples. Dans les deux cas, en effet, la modification de l'excitation équivaut à une variation du nombre des spires inductrices. Le tableau de la page 138, relatif à un moteur Sprague, indique, par exemple, que ces nombres équivalents sont $3m$, $2m$ et m, suivant la combinaison, en appelant m le nombre de spires de chaque galette; on trouverait aisément les nombres correspondants au cas de galettes inégales.

De même, si l'on applique aux bornes des inducteurs, de résistance r_1, un shunt de résistance S, le courant excitateur se trouve réduit dans la proportion des conductances, c'est-à-dire

$$\frac{m'}{m} = \frac{\frac{1}{r_1}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{S}} = \frac{S}{r_1 + S},$$

en appelant m le nombre de spires des inducteurs et m' le nombre équivalent des inducteurs shuntés.

Cela posé, il suffit d'étudier d'une façon générale quel est l'effet d'une modification du nombre des spires excitatrices passant de m à m'.

Pour rétablir la même valeur de l'excitation que celle obtenue d'abord à

l'aide d'un courant I, il faudra faire passer dans l'armature un courant nouveau

$$I' = \frac{m}{m'} I,$$

ce qui revient à modifier l'échelle de la courbe d'excitation du moteur.

L'effort, qui est proportionnel au produit du flux par le courant d'armature, deviendra ainsi également $\frac{m}{m'}$ fois plus grand que l'effort obtenu d'abord [1].

La nouvelle courbe est donc homothétique à l'ancienne par rapport à l'origine; on la construira aisément en augmentant tous les rayons vecteurs dans le rapport $\frac{m}{m'}$ [2].

La nouvelle loi des vitesses se détermine d'une façon analogue : en supposant le même courant d'excitation dans les inducteurs, c'est-à-dire $\frac{m'}{m} I' = I$, les vitesses sont proportionnelles aux forces électromotrices [3], d'où

$$\frac{n'}{n} = \frac{U - \frac{m}{m'}(r_i + r_a) I}{U - (r_i + r_a) I}. \tag{48}$$

[1] Ces modifications peuvent se mettre sous forme algébrique de la manière suivante. Si l'on représente par une fonction

$$F = \Psi (I)$$

la courbe qui relie l'effort moteur au courant dans le moteur à l'état normal, la nouvelle courbe aura pour expression

$$F' = \frac{m}{m'} \Psi (I)$$

ou

$$\frac{m'}{m} F' = \Psi \left(\frac{m'}{m} I'\right)$$

La nouvelle expression algébrique des vitesses se déterminera par des considérations analogues.

Plus généralement, soient I et I' les courants correspondant à deux régimes quelconques du moteur à l'état normal et du moteur à l'état modifié, Φ et Φ' les flux correspondants, n et n' les vitesses, r_i et r'_i les résistances des inducteurs au naturel, puis modifiés.

Les forces électromotrices induites sont dans le rapport

$$\frac{E'}{E} = \frac{n'\Phi'}{n\Phi} = \frac{U - (r'_i + r_a) I'}{U - (r_i + r_a) I}.$$

D'autre part, les efforts sont dans le rapport

$$\frac{F'}{F} = \frac{\Phi' I'}{\Phi I} = \frac{m}{m'} \frac{\Psi\left(\frac{m'}{m} I'\right)}{\Psi (I)}.$$

Donc, en éliminant $\frac{\Phi'}{\Phi}$ entre ces deux relations,

$$\frac{n'}{n} = \frac{U - (r'_i + r_a) I'}{U - (r_i + r_a) I} \times \frac{m'I'}{mI} \frac{\Psi (I)}{\Psi\left(\frac{m'}{m} I'\right)}.$$

La fonction Ψ étant définie par la courbe primitive et r'_i étant déterminé d'autre part pour chaque valeur de $\frac{m'}{m}$, on peut calculer $\frac{n'}{n}$ pour des régimes quelconques.

[2] On pourrait d'ailleurs en modifiant les échelles conserver la même courbe sans changement.

[3] Toujours grâce au fait que la réaction d'induit est supposée négligeable.

Les seconds termes haut et bas étant toujours petits à côté de U, les vitesses sont presque égales; il suffit donc d'amplifier les abscisses dans le rapport $\frac{m'}{m}$, tout en modifiant en même temps les ordonnées dans le rapport $\frac{n'}{n}$.

Le fait que le rapport $\frac{n'}{n}$, toujours voisin de l'unité, varie assez peu avec le rapport $\frac{m}{m'}$, si l'on a soin de faire travailler les inducteurs au-dessous de la saturation, montre qu'on peut obtenir par cette méthode des vitesses assez constantes sous des charges différentes.

Les courbes obtenues pour diverses valeurs du shunt forment un faisceau divergent à partir de l'ordonnée à l'origine, comme celui que donnaient les résistances variables en série (t. II, p. 131). Elles permettent de suivre une méthode analogue pour calculer les résistances du shunt en vue de maintenir la vitesse entre deux limites suffisamment rapprochées.

Mais ici l'effort n'est pas constant avec le courant; quand on quitte une courbe pour prendre la suivante, il faut donc avoir soin de choisir sur celle-ci le point correspondant non pas au même courant, mais au même effort, de façon à pouvoir réaliser dans la variation de l'effort une série continue de valeurs. Ce résultat s'obtient aisément en traçant d'abord les courbes d'effort et de vitesse correspondant à plusieurs valeurs de $\frac{m'}{m}$ et interpolant ensuite dans l'intervalle.

A titre d'exemple numérique, nous appliquerons ces considérations à un moteur de tramway de 15 chevaux, défini dans le cas de la moindre excitation (bobines en parallèle) par les courbes 5,5 de la figure 560 et réglé par la méthode Sprague; nous supposerons, pour simplifier, les trois galettes d'inducteur égales, ayant même nombre de spires et même résistance; d'après la place disponible sur les noyaux, chacune de ces résistances sera de 2,6 ohms, chiffre qui correspond bien aux conditions pratiques pour des moteurs de ce genre (voir p. 139).

Les résistances d'inducteurs correspondant aux diverses combinaisons du tableau de la page 138 sont ainsi les suivantes :

1	résistance	totale	7,8 ohms
2	—	—	5,2 —
3	—	—	2,6 —
3 *bis*	—	—	3,9 —
4	—	—	1,3 —
5	—	—	0,87 —

Les rapports $\frac{m'}{m}$ pris relativement à ce point de départ auront donc les valeurs énoncées plus haut, à savoir : 3, 2, 2, 1, 1 et 1. Les courbes correspondantes s'obtiendront en amplifiant les courants et les efforts dans les rapports 3, 2 et 1, et les vitesses dans les rapports $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ et 1.

La figure 560 montre que la régulation, sans être parfaitement continue, est en somme satisfaisante, puisqu'elle permet de maintenir la vitesse sensible-

ment constante (14-16 km : h.) quand l'effort varie de 100 à 500 kg. On remarquera aussi que les courbes 2 et 3 font sensiblement double emploi, ainsi que les courbes 4 et 5, et que, par suite, quatre d'entre elles donneraient le même résultat que les six.

Pour donner maintenant un exemple de la méthode du shunt, supposons qu'on parte de la position (3 *bis*) ($r_1 = 2{,}6$ ohms, $r_1 + r_2 = 2{,}6 + 0{,}7 = 3{,}3$ ohms) et qu'on dérive une fraction croissante du courant dans des résistances extérieures.

Pour maintenir la vitesse entre 14 et 17 km : h., tout en réalisant une série

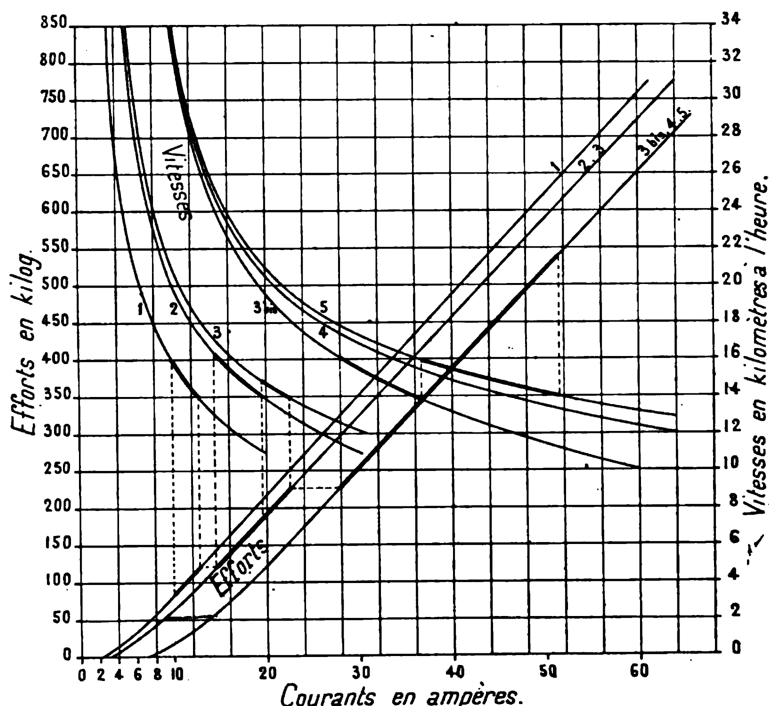


Fig. 560. — Courbes de fonctionnement d'un moteur de tramway de 15 chevaux avec régulation Sprague; résistance d'une galette, 2,60 ohms; trois galettes égales. Les chiffres des courbes indiquent les combinaisons correspondantes de la figure 555.

continue d'efforts, il faudra employer les courbes de la figure 561, correspondant aux valeurs $\frac{m'}{m} = 1{,}5$ et 2,3, c'est-à-dire à des shunts

$$S = 5{,}2 \text{ ohms et } 2 \text{ ohms}.$$

La suite des vitesses réalisables sera représentée par une série de tronçons formant dents de scie, mais sans côtés verticaux.

La perte de puissance résultant de l'emploi du shunt lorsque la dérivation est maxima atteint, au régime moyen de 25 ampères, $2 \times (14{,}13)^2 = 400$ watts, soit 3,2 p. 100 de l'énergie totale consommée par le moteur.

La même figure permet de déterminer également une série de shunts satisfaisant à la condition d'uniformisation de la puissance consommée. On tracera deux verticales correspondant aux limites entre lesquelles on veut maintenir la valeur du courant consommé et l'on choisira sur les courbes d'effort une série d'échelons compris entre ces droites, de façon que l'effort à l'extrémité droite d'un tronçon soit toujours au plus égal à l'effort à l'extrémité gauche du tronçon précédent ; pour réduire le nombre de touches du rhéostat au minimum, on placera les extrémités à peu près sur une même horizontale.

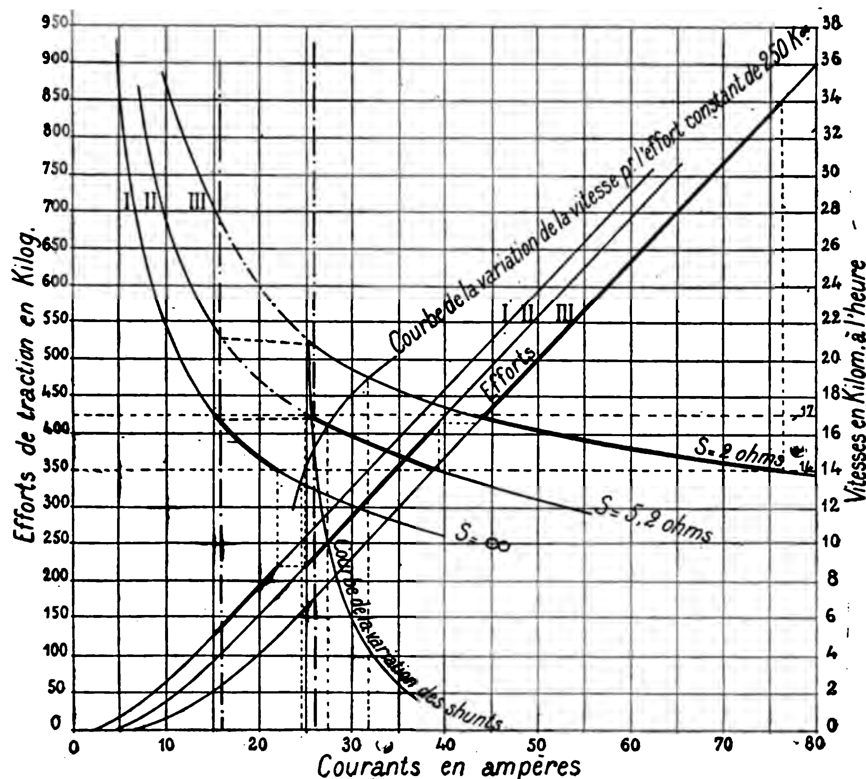


Fig. 561. — Courbes de fonctionnement du même moteur réglé par un shunt à deux résistances de 2 et 5,2 ohms, la résistance propre des inducteurs étant de 2,6 ohms.

Les tracés en pointillé mixte montrent le résultat obtenu par cette méthode sur le moteur précédent en imposant 15 et 25 ampères comme limite du courant. Si l'on examine les courbes des figures 560 et 561, on voit que, pour le réglage à vitesse constante, il y a intérêt à saturer rapidement les inducteurs, parce que la partie horizontale des courbes se trouve reportée ainsi vers la gauche ; au contraire, pour le réglage à courant constant, il y a intérêt à reporter les courbes vers la droite en saturant peu les inducteurs. Dans le premier cas, on doit craindre les étincelles aux balais aux fortes charges ; dans le second cas, c'est aux faibles charges.

Pour donner un exemple des limites pratiques imposées par ces étincelles, nous citerons les résultats obtenus sur un moteur de 25 chev. de la maison Kummer, établi par M. Fischinger. Les courbes de la figure 562, déduites de celles relevées par cet ingénieur[1], représentent les variations de la vitesse en fonction du courant. La courbe *a*, qui correspond à la pleine excitation sans rhéostat, peut être utilisée sans étincelles jusqu'à 70 ampères ; les courbes *b* et *c* correspondent à deux champs affaiblis d'environ 1/8, puis de 1/3, aux régimes moyens, et la courbe *c* donne la limite de ce qu'on peut obtenir dans cette voie. On réalise ainsi une régulation assez étendue et qui permettrait une vitesse suffisamment constante ; par exemple, dans l'intervalle de 17 à 15 km : h., le courant varie de 17 ampères (courbe *a*) à 40 ampères (courbe *c*). Le champ étant en même temps réduit dans la proportion de 1 à 2/3, le couple varie dans le rapport $\frac{2}{3}\frac{40}{17} =$ 1,60, soit d'environ 60 p. 100.

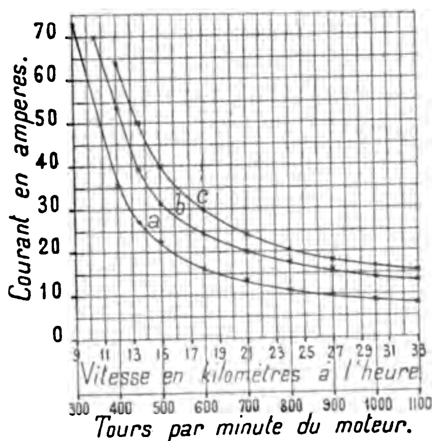


Fig. 562. — Courbes de régulation par shunt du moteur Kummer de 25 chevaux.

L'expression de la vitesse en fonction du courant (46) donnée plus haut dans le cas d'un moteur en dérivation reste exacte ici ; nous en avons fait l'application à l'exemple considéré en traçant sur la figure 561 la courbe de variation de la vitesse sous un effort de traction constant de 250 kg. ; la courbe des shunts correspondante indique les valeurs du shunt en ohms à une échelle, non tracée, double de celle des vitesses.

Méthodes mixtes. — Dans la pratique, les deux méthodes précédentes ont toujours été combinées plus ou moins ensemble.

D'une part, malgré ses avantages, la méthode de commutation ne permet pas à elle seule de réaliser un bon réglage dans toute l'échelle des vitesses. En effet, pour que les inducteurs, qui jouent, comme nous l'avons dit, le rôle de rhéostat, ne s'échauffent pas d'une façon dangereuse, on est obligé de leur donner des résistances assez faibles ; celles-ci se trouvent alors insuffisantes pour produire les petites vitesses dont on a besoin quelquefois et réduire le courant de démarrage à une valeur acceptable.

On a constaté, par exemple, que le moteur Sprague de 25 chev.

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1896.

à 3 galettes, calculé pour une vitesse maxima de 10 km., était incapable de ralentir son allure au-dessous de 6 km. sans l'intervention d'un rhéostat, et le courant de démarrage n'a pu être limité à une valeur acceptable que par l'emploi d'une résistance de 6 à 8 ohms. On a été ainsi conduit à adjoindre à la méthode de commutation de champ un rhéostat variable permettant de réduire progressivement la résistance depuis un certain maximum jusqu'à zéro avant d'agir sur le groupement des bobines.

Ce *rhéostat de démarrage* fait aujourd'hui partie de tous les systèmes de régulation à potentiel constant.

La figure 547 donne, par exemple, le schéma d'une régulation par shuntage des inducteurs avec rhéostat de démarrage. On peut simplifier les appareils, comme l'a montré M. *Fischer-Hinnen*[1], en adoptant, au lieu de deux rhéostats, un seul appareil à deux manettes (fig. 563) : pendant le démarrage, on laisse la manette du bas N sur le plot mort D et l'on amène progressivement la manette supérieure M du plot A au plot B, qui ne laisse aucune résistance en circuit; ensuite, s'il faut accélérer davantage la marche, on ramène la manette N vers la droite, ce qui dérive une partie du courant de B à N; un arrêt *a* empêche de réduire la résistance du shunt au delà d'une valeur déterminée. L'inconvénient de cette méthode, c'est qu'il faut calculer les résistances à deux fins ; mais on n'est pas obligé de donner au rhéostat les mêmes divisions sur les deux séries de plots; il est même rationnel de supprimer du côté N les grandes résistances et d'accroître le nombre des divisions des petites.

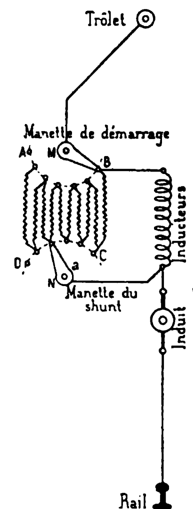


Fig. 563. — Exemple d'une régulation mixte avec un seul rhéostat.

D'autre part, il est aisé de se rendre compte qu'indépendamment de toute question de réglage de la vitesse une modification momentanée de l'enroulement inducteur est rendue nécessaire dans tous les cas par le mode de construction des moteurs en série. Du

[1] *Die Wirkungsweise elektrischer Gleichstrom Maschinen*, 1897, p. 102.

moment, en effet, où l'on veut exciter les inducteurs avec un faible courant, il faut les couvrir d'un grand nombre de spires, auxquelles on est obligé de donner une faible section pour pouvoir les loger sans trop accroître les dimensions du moteur. Si l'on conservait la même disposition lorsque le courant devient considérable, il en résulterait aux fortes charges un échauffement exagéré de la machine, en même temps qu'un ralentissement par l'effet de la chute de voltage ; on évite ces deux inconvénients en réduisant la densité du courant dans les spires par l'un ou l'autre des deux artifices indiqués au paragraphe précédent, de préférence par le plus simple, c'est-à-dire le shuntage du champ inducteur. Ce dispositif est, du reste, employé aujourd'hui accessoirement dans presque toutes les applications où l'on utilise des méthodes de réglage basées sur d'autres principes.

Pour tirer parti de la variation de voltage aux bornes, certains auteurs, tels que M. Henry[1], n'ont pas craint de recommander la distribution à 3 fils, par 2 fils isolés et la voie comme fil neutre; en mettant le moteur en circuit tantôt entre les deux fils isolés, tantôt entre l'un d'eux et les rails, on ferait varier la vitesse dans la proportion de 2 à 1. Mais le système à 3 fils, qui n'a pu réussir jusqu'ici par suite de considérations pratiques, perdrait, si on l'employait ainsi, une partie des autres avantages qui le rendent désirable.

Un autre cas serait celui de lignes divisées en tronçons alimentés à des potentiels différents ; on pourrait, par exemple, en alimentant au potentiel de 7 ou 800 volts des lignes suburbaines faisant suite à des lignes urbaines à 4 ou 500 volts, réaliser, en même temps qu'une importante économie de cuivre, la différence de vitesse désirable entre les deux parties du parcours. Le même matériel générateur pourrait distribuer l'énergie aux divers tronçons, à condition d'adjoindre des survolteurs pour l'alimentation de la partie suburbaine.

La possibilité pratique de cette double alimentation est suffisamment établie par l'exemple de la ligne de Washington, Alexandria and Mount Vernon, qui présente une partie à distribution aérienne à 600 volts et une conduite souterraine à 220 volts[2]; on a vu plus haut les dispositifs employés pour permettre l'éclairage des voitures dans ces deux conditions si différentes.

C. Changement de couplage des moteurs, méthode « série-parallèle ». — Le principe de la méthode « série-parallèle », qui semble avoir été indiquée pour la première fois par *J. Hopkinson*, puis par

[1] *The Electrical Engineer*, 18 septembre 1895.

[2] Le voltage réduit de 220 volts a été adopté dans ce cas surtout pour faciliter le maintien de l'isolement des conducteurs souterrains ; c'est à un point de vue tout différent que nous nous plaçons ici.

Reckenzaun, est contenu dans les remarques faites plus haut (t. II, p. 116) sur les propriétés des couplages.

Le couplage en parallèle (fig. 541 *a*) et le couplage en série (fig. 541 *b*) permettent de faire varier du simple au double, à vitesse égale, la force contre-électromotrice opposée à la tension du réseau ; à couple égal, la vitesse obtenue dans le premier cas sera donc sensiblement double de celle obtenue dans le second, et, comme il n'y a ni dans l'un ni dans l'autre de rhéostat en circuit, le rendement varie relativement assez peu et est aussi élevé que possible, contrairement à ce qui se produit dans toutes les méthodes précédentes. Au démarrage, les deux moteurs étant en série produisent le même couple total avec un courant moitié moindre que celui qu'ils absorberaient s'ils étaient en parallèle ; en outre, il suffit, pour limiter le courant à une même valeur maxima, d'une résistance notablement moindre.

Pour réaliser ces changements de couplage, il n'est besoin que d'un commutateur approprié, et il semble que cette méthode eût dû être adoptée depuis longtemps. Cependant Sprague, après l'avoir employée quelque temps en 1888, l'avait abandonnée, de peur, dit-on, de compliquer le problème, et avait préféré conserver les deux moteurs couplés toujours en parallèle pour mieux assurer leur indépendance. Tout le monde avait suivi cet exemple en Amérique et, jusqu'en 1890, on s'était contenté d'appliquer à chacun des deux moteurs les méthodes indiquées plus haut pour un seul.

Les dépenses trop grandes d'énergie résultant de cette façon de faire ont cependant amené, trois ans plus tard, les compagnies américaines à reprendre la question et, après divers tâtonnements, elles sont arrivées rapidement à une solution élégante et simple.

La difficulté à résoudre était seulement d'établir des transitions entre les deux régimes de vitesse que donnent les deux couplages et qui ne peuvent constituer à eux seuls une gradation suffisante. Quelques ingénieurs pensaient au début que le mieux était d'ajouter un commutateur spécial pour le changement de couplage aux dispositifs de régulation déjà employés et de ne faire intervenir ce commutateur que rarement, par exemple lorsque la voiture passait de rues fréquentées dans des rues à faible circulation ou dans la campagne; comme on le verra plus loin, cette idée a été

aussi en faveur en France, où elle a été appliquée notamment sur les tramways de Paris et du département de la Seine. Mais on a reconnu qu'il était bien préférable de combiner le commutateur et les autres dispositifs de réglage en un seul appareil, et d'utiliser les méthodes anciennes simplement à produire des étapes intermédiaires dans la série des régimes.

M. *Parshall*, qui a réalisé le premier système de régulation « série-parallèle » pour l'Edison General Electric Co., en 1891, a eu recours d'abord au procédé ordinaire de celle-ci, la commutation des bobines de champ, et il a été amené ainsi à combiner les deux couplages avec des connexions variables des galettes de chaque inducteur. Mais cette disposition, qui péchait par un excès de complication, a bientôt été abandonnée et, bien que quelques

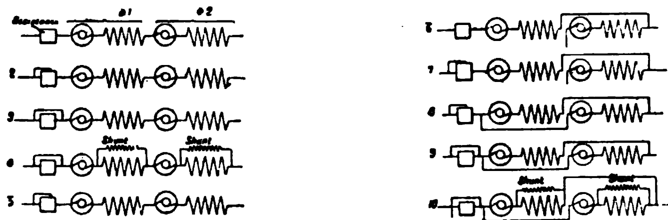


Fig. 564. — Schéma des combinaisons de la méthode série-parallèle appliquée au cas de deux moteurs.

1, 2, 3, 4, régimes variés des moteurs en série.
5, 6, 7, combinaisons de transition pour faciliter la commutation des courants.
8, 9, 10, régimes variés des moteurs en parallèle.

spécialistes proposent de temps à autre d'y revenir, il est peu probable qu'on l'emploie désormais.

Aujourd'hui, les régimes intermédiaires sont obtenus, de même que dans les méthodes mixtes ci-dessus, au moyen de résistances en série et de shunts [1] qui sont intercalés successivement dans chaque couplage, comme le montre le schéma (fig. 564), et l'on s'impose de n'employer d'une manière prolongée que les régimes sans rhéostat. Ce système, que nous indiquons ici sommairement, mais qui est décrit plus loin d'une manière complète, a été adopté en 1893 d'abord par la General Electric Co., puis par toutes les autres compagnies américaines. Il présente l'avantage d'une grande simplicité.

[1] L'archaïque méthode de la « boucle » (p. 137) est aujourd'hui abandonnée.

La figure 565 donne un exemple des rendements obtenus avec un équipement à deux moteurs, d'après des chiffres relevés en service courant par M. S. H. Hering; il s'agissait de moteurs Westinghouse n° 3; aujourd'hui, on atteint des chiffres un peu plus élevés.

Jusqu'ici, on n'a guère eu à appliquer la méthode des couplages variables qu'au cas de deux ou de quatre moteurs; mais cette méthode est évidemment générale et pourrait être appliquée à l'ensemble des moteurs d'un train formé de plusieurs automobiles attelées ensemble. Elle présenterait seulement une complication croissante avec le nombre des moteurs et l'on peut considérer le nombre

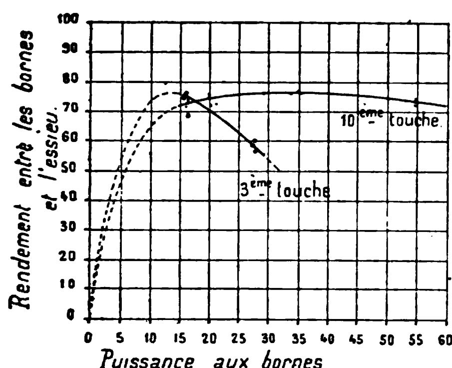


Fig. 565. — Rendements pratiques obtenus avec un équipement série-parallèle (les puissances sont exprimées en chevaux).

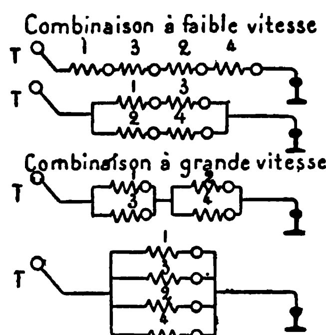


Fig. 566. — Méthode série-parallèle. — Groupements de quatre moteurs.

de quatre (quatre moteurs ou quatre groupes) comme un maximum. Ces quatre groupes peuvent, comme on l'a vu plus haut (t. II, p. 123), donner lieu à trois couplages distincts fournissant des forces électromotrices croissantes suivant la proportion 1, 2 et 4, ce qui, si l'on ajoute encore des shunts sur les inducteurs, suffit à assurer une régulation très parfaite et très continue. On pourrait, dans ces conditions, supprimer l'emploi de tout rhéostat pour le démarrage, mais il vaut toujours mieux en conserver un pour adoucir le départ.

En pratique, comme l'emploi des trois combinaisons de la figure 544 conduit à une certaine complication des commutateurs, on préfère souvent diviser les quatre moteurs en deux groupes,

formés soit de deux unités en série, soit de deux unités en parallèle, et l'on fait alors porter les changements de couplage sur ces deux groupes de deux pris en bloc. Mais on profite mieux des avantages de la méthode en ajoutant dans chaque groupe un commutateur spécial, qui permet de mettre les deux moteurs tantôt en série, tantôt en parallèle ; en se réservant de ne manœuvrer ces commutateurs que rarement, par exemple lorsqu'on passe de l'intérieur d'une ville dans les faubourgs, on peut les séparer du régulateur et conserver à celui-ci toute sa simplicité. La figure 566 représente les combinaisons qu'on réalise de la sorte sur de nombreuses lignes américaines en partie urbaines et en partie suburbaines.

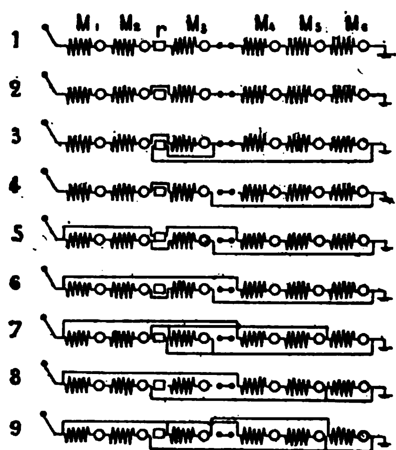


Fig. 567. — Méthode série-parallèle. Groupements de six moteurs.

Sur la ligne du pont de Brooklyn, les locomotives électriques, qui remorquent des trains de 120 t. à la vitesse de 18 km : h. sur une rampe de 3,78 p. 100, sont équipées de cette façon avec des régulateurs série-parallèle K14. Un disjoncteur automatique se déclenche lorsque le courant dépasse 800 ampères.

On a même réalisé des combinaisons série-parallèle pour des équipements à six moteurs; la figure 567 en donne un exemple dû à la General Electric Co. et qui s'explique de lui-même.

Ce genre de régulation s'applique également aux moteurs excités en dérivation, à la seule condition de prendre les précautions indiquées précédemment (t. II, p. 121).

Lorsque le nombre des moteurs dépasse quatre, les courants à manier deviennent très considérables et il est préférable de répartir ces moteurs en groupes de deux, qu'on règle séparément, tout en maintenant pour le mécanicien la possibilité de les manœuvrer simultanément par l'emploi de transmissions ou de servomoteurs appropriés, dont on verra des exemples au paragraphe 3.

Régimes obtenus par la méthode série-parallèle. — La méthode série-parallèle ne donne par elle-même qu'un nombre de régimes très limité, deux dans le cas de deux moteurs, trois dans le cas de quatre moteurs ; les courbes correspondantes sont donc très distantes. En ajoutant à chaque couplage une modification par shunt, on double le nombre de ces combinaisons. Les courbes correspondant aux deux couplages en série et en parallèle se déduisent des courbes correspondantes d'un seul moteur par la méthode indiquée ci-dessus (t. II. p. 124) et les courbes avec shunt par la méthode de la page 143.

A titre d'exemple de ce calcul, la figure 568 représente les courbes obtenues pour une voiture munie de deux moteurs semblables à celui étudié plus haut (p. 146). Les courbes en traits forts se rapportent à la marche sans shunt et les

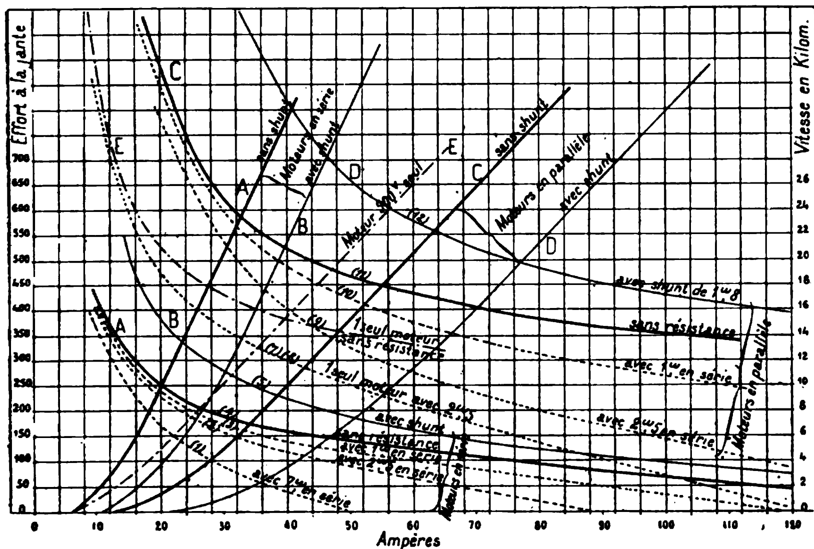


Fig. 568. — Courbes complètes de fonctionnement d'un équipement à deux moteurs avec combinaisons série-parallèle. Les courbes en traits mixtes définissent un moteur seul, les courbes en traits forts la marche en série ou en parallèle sans shunt, les courbes en traits fins la marche avec shunt et les courbes en pointillé la marche avec rhéostat en série.

E, moteur seul. — A et B, moteurs en parallèle. — C et D, moteurs en série.

courbes en traits fins au cas où l'on applique à chaque moteur un shunt de 1,6 ohm; elles doivent être employées seulement dans les limites où l'affaiblissement ne produit pas d'étincelles exagérées aux balais. Ces courbes sont déduites des courbes en traits mixtes relatives à un moteur seul.

On voit que l'intervalle entre les deux groupes de courbes est très grand; pour réaliser des lignes intermédiaires, tracées en traits pointillés, il faut recourir à l'addition de résistances en série convenablement choisies. Ces lignes se tracent suivant les méthodes indiquées plus haut (p. 130).

L'épure ainsi déterminée donne les éléments complets d'une régulation série-parallèle. En fait, la variation de champ et, par suite, la vitesse réalisée

par l'emploi du shunt sont plus restreintes, comme le montrent, par exemple, les courbes de la figure 527 relative à un bon type américain, le G. E. 800, avec et sans son shunt. Aussi, le plus souvent, la méthode série-parallèle ne permet-elle d'utiliser aux vitesses admises que deux des quatre courbes économiques (sans rhéostat), soit les courbes A et B, soit les courbes C et D ; en pratique, on devra s'arranger pour marcher normalement sur les courbes A et B, en conservant les courbes C et D pour le démarrage et les fortes rampes. Il existe en France plusieurs installations où, au contraire, faute d'avoir modifié les enroulements d'induit de moteurs importés d'Amérique et donnant des vitesses trop grandes, on a dû renoncer pratiquement au couplage en parallèle et se résoudre à marcher constamment sur les courbes A et B, ce qui enlève à cette régulation toute sa raison d'être. On doit donc apporter beaucoup de

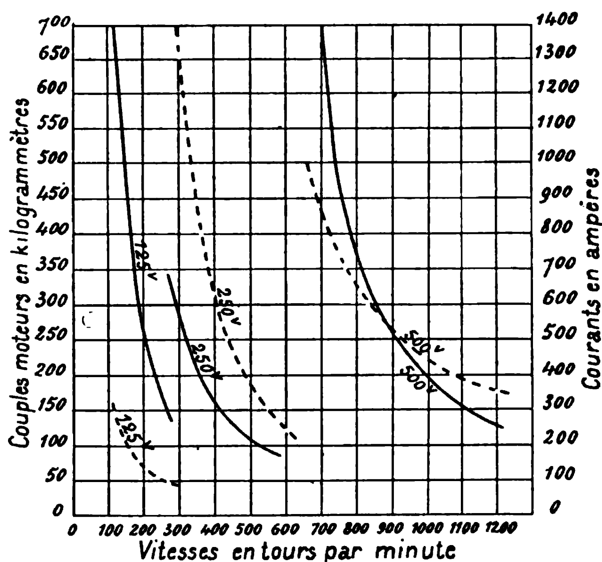


Fig. 569. — Caractéristiques totales d'un équipement à quatre moteurs de 75 kilowatts excités en série, disposés suivant les trois combinaisons de la figure 544 pour la régulation série-parallèle. Grandes courbes, couples; petites courbes, courants.

discernement dans l'emploi de la méthode série-parallèle et tenir compte des observations précédentes.

Comme second exemple, nous donnons sur la figure 569 les courbes totales d'effort et de courant correspondant aux trois combinaisons principales d'un équipement à quatre moteurs de 100 chevaux du type défini par les courbes des figures 537 à 539 ; ces caractéristiques, qui sont de simples transformations des précédentes, montrent bien ce que peut donner ce mode de régulation avec quatre unités.

D. Variation du bobinage de l'armature, méthode du double induit. — Au lieu de coupler deux moteurs séparés tantôt en série

et tantôt en parallèle, rien n'empêche d'appliquer le même principe à un moteur isolé : on peut, en effet, disposer sur un même noyau d'armature deux bobinages semblables, aboutissant chacun à un collecteur et constituant deux circuits absolument indépendants, qu'on couplera à volonté en série ou en parallèle.

Cette solution équivaut, au point de vue des résultats, à doubler ou dédoubler le nombre de spires de l'induit, et c'est la seule qu'on puisse espérer employer pratiquement pour obtenir une modification de celui-ci. On a déjà construit des moteurs de ce genre : MM. Sautter-Harlé notamment en ont fait une application très heureuse à la commande des grues, tourelles cuirassées, etc., précisément dans le but d'obtenir le réglage de la vitesse à peu de frais ; mais ils n'ont pas encore été employés dans la traction, où l'on s'est préoccupé jusqu'ici de simplifier les organes beaucoup plus que de les compliquer.

Le mode d'emploi de ces moteurs pourrait être calqué sur le système série-parallèle en divisant les enroulements inducteurs en deux moitiés égales. Si l'on couplait chacune de celles-ci invariablement en série avec l'un des enroulements de l'armature, on retomberait exactement sur le cas du réglage série-parallèle avec emploi de rhéostats ; mais il serait à craindre que, lors de la mise des circuits en parallèle, la saturation des inducteurs ne fût insuffisante ; on devra, pour éviter cet inconvénient, mettre en parallèle d'abord les induits, puis ensuite les bobines de champ ; comme les deux circuits d'armature tournent dans un seul et même champ, leur mise en parallèle directe ne peut amener ici les inconvénients signalés dans le cas de deux moteurs séparés (t. II, p. 117).

Enfin, en employant sur une même voiture deux moteurs de ce genre et les couplant eux-mêmes tantôt en série, tantôt en dérivation, tout se passerait sensiblement comme si l'on avait affaire à quatre moteurs et l'on pourrait supprimer rapidement le rhéostat pendant le démarrage, comme nous l'avons dit plus haut.

Mais il ne faut pas se dissimuler qu'un double enroulement est un peu plus compliqué qu'un enroulement simple. Aussi, sur les voitures à deux moteurs, la présence de quatre collecteurs à entretenir effraierait-elle à bon droit les exploitants, et les avantages

réalisables pour la régulation ne seraient pas suffisants pour justifier cette solution. Mais il peut en être autrement sur les voitures à un seul moteur, car la réduction de la consommation d'énergie par l'emploi des deux induits y prend une très grande importance.

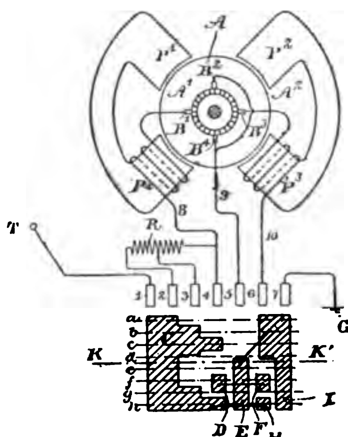


Fig. 570. — Schéma de la méthode Wightman pour la régulation d'un équipement à un seul moteur.

Un autre dispositif, qui a été proposé récemment par M. *Wightman*, permettrait, s'il fonctionne convenablement en pratique, d'arriver au même résultat tout en n'employant qu'un seul collecteur au lieu de deux. Il consiste dans l'emploi d'un moteur qui peut être rendu à volonté bipolaire ou tétrapolaire. A cet effet, les inducteurs P (fig. 570) forment deux circuits magnétiques séparés, excités chacun par une seule bobine. L'induit A est muni de 4 balais, dont deux B^1, B^3 sont constamment en service et dont les deux autres B^2, B^4 n'ont à fournir de courant que dans certains cas. Lorsque l'on produit en P^3, P^4 deux pôles de même polarité, les pôles opposés P^1, P^2 prennent tous deux la polarité contraire et le moteur se trouve dans les conditions d'un moteur bipolaire. Si l'on inverse la polarité de l'un des pôles, P^4 par exemple, P^1 change également de signe et le moteur devient tétrapolaire ; les deux balais B^2 et B^4 deviennent actifs à leur tour et de même signe, B^1 et B^3 prenant aussi une polarité commune.

Au point de vue de l'effet produit, tout se passe comme si l'induit était composé de deux enroulements, couplés d'abord en série, puis en parallèle, et la force électromotrice est moitié moindre dans le second cas que dans le premier.

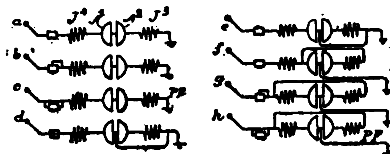


Fig. 570 *bis*. — Méthode Wightman. Schéma des combinaisons réalisées.

J^3, J^4, bobines d'inducteurs.
A^1, A^2, parties d'armature.

On voit au-dessous de la figure 570 le schéma du commutateur qui effectue es combinaisons. Cet appareil tourne autour de l'axe KK' et les combinaisons correspondant aux huit positions *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *h* sont représentées schématiquement sur la figure 570 *bis*. L'indication PF désigne les combinaisons convenant à un fonctionnement permanent, parce qu'il n'y a aucune résistance à intercaler; les autres ne sont que des positions de passage Les deux moitiés de l'armature sont représentées par deux segments A^1 et A^2 ; J^3, J^4 désignent les bobines qui correspondent aux pôles P^3 et P^4. Cette série de combinaisons est, d'ailleurs, la reproduction presque identique de celle qui a été donnée pour la méthode série-parallèle.

II. — Régulation par variation de potentiel

Les méthodes qu'il nous reste à examiner s'appliquent seulement aux véhicules portant avec eux une source d'électricité (sous forme de dynamo génératrice ou d'accumulateurs) et se présentent par suite avec un caractère un peu exceptionnel ; pour les motifs indiqués plus haut (t. II, p. 84) elles s'appliquent plus spécialement aux moteurs en série.

Régimes d'un moteur soumis à des voltages variés aux bornes. — L'effet de la variation du potentiel aux bornes sur le fonctionnement des moteurs a

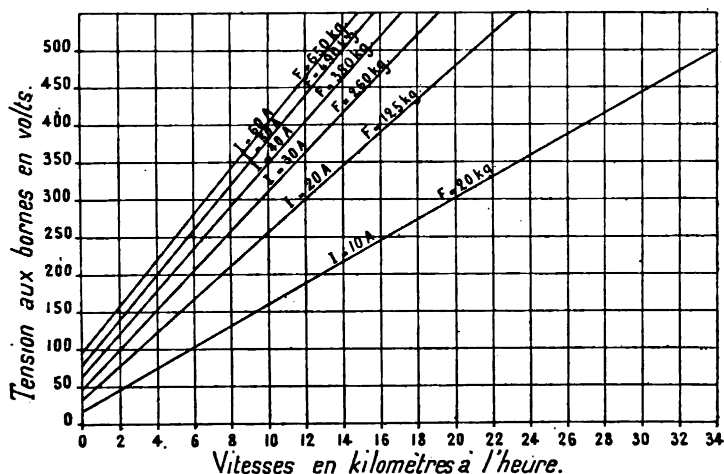


Fig. 571. — Caractéristiques linéaires à effort constant pour la régulation à potentiel variable du moteur défini par la figure 518.

déjà été examiné plus haut (p. 111). On peut s'en rendre compte plus commodément à l'aide d'un autre mode de représentation plus simple où les courbes sont remplacées par de simples droites ; on a, en effet, en vertu de l'équation (14), la relation

$$U = (\Phi N)\, n + (r\, I), \qquad (49)$$

dans laquelle n est la vitesse, N le nombre de spires, Φ le flux magnétique (constant ou fonction de I) et r la résistance intérieure du moteur. Pour chaque valeur fixe du courant, les parenthèses sont constantes ; en donnant à I et par suite à l'effort moteur une série de valeurs, on représentera donc d'une manière très complète par un faisceau linéaire le fonctionnement du moteur sous diverses tensions aux bornes ; ces droites sont aisément déterminées par leurs ordonnées à l'origine rI et par un de leurs autres points, correspondant

au voltage normal, point qu'on déduit des courbes fondamentales relatives à ce voltage.

A titre d'exemple, la figure 571 donne les droites ainsi déterminées d'après la courbe de la figure 518 (p. 88); il suffit d'interpoler entre ces lignes si l'on a besoin de régimes intermédiaires.

Ces épures donnent une idée complète de la régulation par variation du voltage. Tous les régimes sont réalisables, lorsqu'on peut graduer la tension par degrés insensibles. Lorsque au contraire on ne dispose que d'un petit nombre d'échelons, la vitesse varie en fonction de l'effort suivant une loi facile à lire sur l'épure en prenant une section horizontale du faisceau de droites.

Ceci posé, il nous reste à examiner l'application de la méthode dans les deux cas mentionnés au début de ce paragraphe.

Méthode de la variation d'excitation de la génératrice. — Cette méthode a été préconisée en Amérique, dès 1892, par M. *Ward Leonard*[1], qui en a fait un grand nombre d'applications heureuses à des moteurs fixes, surtout pour des ascenseurs, puis en France par M. *Heilmann*, qui l'a appliquée successivement à ses locomotives automotrices et à ses machines à alimentation extérieure.

Le mode de réglage indiqué par M. Ward Leonard consiste, tout en maintenant la vitesse constante, à faire varier par un rhéostat l'excitation de la génératrice et, par suite, la tension aux bornes des moteurs. Le courant pris par les moteurs est déterminé de lui-même, comme on le sait, par le couple résistant à vaincre et ne dépend, par suite, que du profil en long, tandis que la vitesse est sensiblement proportionnelle à la tension aux bornes. En modifiant l'excitation, on fait donc varier à volonté la vitesse à couple constant (ou réciproquement le couple à vitesse constante), sans avoir jamais besoin de régler le courant par des résistances consommant de l'énergie. En particulier, au démarrage, on donne à la génératrice l'excitation juste suffisante pour produire le courant requis. Soient r la résistance intérieure de la génératrice, r' celle du moteur, I le courant nécessaire à celui-ci pour produire le couple voulu au démarrage; il suffit de donner à la génératrice la force électromotrice

$$E = (r + r') I.$$

[1] *Proc. Am. Inst. of El. Eng.*, 1892.

Aussitôt la voiture en mouvement, on accroît l'excitation de façon à accélérer peu à peu l'allure jusqu'au régime normal.

Outre l'économie d'énergie réalisée, ce dispositif présente l'avantage de n'exiger aucune interruption du courant principal, les rhéostats étant intercalés sur le courant d'excitation qui n'atteint qu'une faible fraction du précédent ; il convient donc particulièrement à tous les cas où l'on doit développer de grandes puissances.

En pratique, l'application de ce procédé, théoriquement parfait, rencontre deux difficultés d'inégale importance.

D'une part, on ne produit pas, en général, le courant sur la voiture elle-même, mais à la station, où l'on ne peut habituellement faire varier le voltage. M. Ward Leonard est donc obligé de placer sur chaque voiture un convertisseur tournant, formé d'un moteur accouplé à une génératrice de même puissance que tous les moteurs de la voiture réunis. Ce moteur auxiliaire est actionné, à potentiel constant, par le courant du trôlet, et l'on envoie aux moteurs des essieux le courant de la génératrice dont le voltage est réglable à volonté. Sous cette forme, le système est très général et se prête évidemment aussi bien à l'emploi des courants alternatifs qu'à celui du courant continu. La figure 572 en représente schématiquement la disposition dans ce dernier cas.

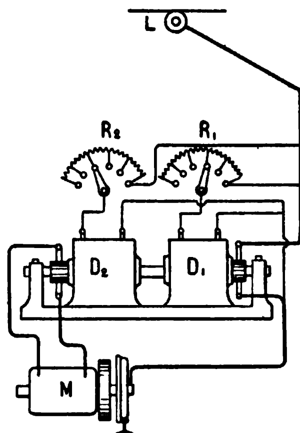


Fig. 572. — Schéma de la régulation Ward Leonard appliquée aux locomotives Heilmann à alimentation extérieure.

D_1, réceptrice à haute tension, D_2, génératrice à basse tension. — R_1 et R_2, rhéostats d'excitation. — M, moteur attaquant l'essieu.

La régulation, par ce système, est des plus faciles : au départ, on excite la réceptrice D_1 à sa valeur normale et on lance le convertisseur à vide jusqu'à sa vitesse de régime, sans exciter la génératrice D_2; puis on envoie dans les inducteurs un courant d'abord faible, qu'on augmente jusqu'au moment où le couple réalisé est suffisant pour le démarrage; on continue cet accroissement au fur et à mesure de l'accélération jusqu'à ce qu'on atteigne la vitesse normale.

Le système du convertisseur à courant continu vient d'être appliqué par M. Heilmann à ses locomotives de Saint-Germain, mentionnées plus haut (t. I, p. 478), dans le but d'éviter la commutation des courants intenses qu'elles exigent. Le transformateur tournant qu'on voit sur la figure 572 comprend deux dynamos à quatre pôles montées sur un bâti commun ; les induits enroulés en tambour sont clavetés sur le même arbre. Les inducteurs des deux dynamos sont excités chacun séparément par un courant pris en dérivation sur la ligne à 400 volts; on maintient l'excitation du moteur constante, de façon que sa vitesse reste sensiblement égale à 800 tours par minute, et l'on fait varier celle de la dynamo à l'aide d'un rhéostat d'excitation ; le courant produit à la tension variable de 0 à 350 volts alimente les quatre moteurs du truck ; l'intensité maxima est de 1 200 ampères. Un coupleur permet de mettre les moteurs soit en parallèle, soit par deux en série; un commutateur quadruple rend possible l'inversion de marche en changeant le sens du courant dans les armatures des moteurs; il eût été encore plus simple d'inverser le courant d'excitation de la génératrice, mais cette manœuvre aurait exigé plus de précautions à raison de la self-induction de l'enroulement inducteur.

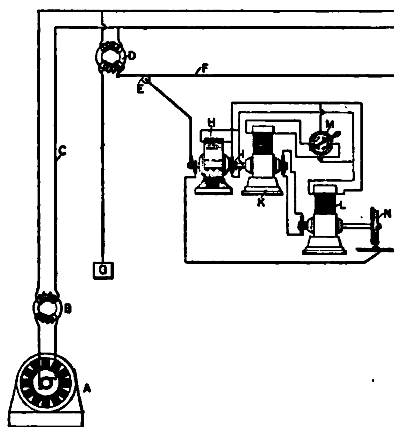


Fig. 573. — Schéma de la méthode Ward Leonard appliquée aux courants alternatifs.

A, alternateur à basse tension. — B, transformateur élévateur. — C, ligne primaire. — D, transformateur réducteur. — F, ligne secondaire. — E, trôlet. — H, moteur synchrone et convertisseur. — K, génératrice à courant continu. — M, rhéostat d'excitation. — L, moteur attaquant l'essieu.

Le transformateur tournant est moins encombrant et moins cher qu'on pourrait le craindre, parce qu'il tourne à une vitesse constante aussi élevée que le permet la force centrifuge. Son emploi abaisse évidemment beaucoup le rendement maximum, car le rendement de la transformation ne peut guère dépasser 80 à 85 p. 100; cependant, M. Heilmann estime que les économies assez importantes d'énergie réalisées aux démarrages par la suppression du rhéostat en série compensent d'une façon suffisante cette cause d'infériorité. L'expérience répondra à cette assertion.

La méthode Ward Leonard donne également une solution du problème de la traction par courants alternatifs [1], à laquelle nous avons fait allusion plus haut (t. I, p. 236), lorsqu'on remplace le moteur à courant continu du convertisseur par un moteur synchrone ou asynchrone à courants alternatifs (fig. 573).

Mais si la solution est simple en théorie, on ne peut guère son-

[1] Cf. « How we shall operate an electric railway extending 100 miles from the power station », par M. H. Ward Leonard, *Am. Inst. El. Eng.*, 21 février 1894.

ger en pratique à installer un semblable convertisseur sur une automobile, tout au moins sur une voiture de tramway, à cause de l'encombrement et du prix excessif de l'appareil. On doit donc conclure que la méthode n'est applicable pratiquement qu'aux locomotives séparées, où l'on dispose d'une place suffisante.

En second lieu, on peut se demander si ce système, qui réduit souvent le champ magnétique à une très faible valeur, tout en conservant au courant d'armature toute son intensité, ne risque pas ainsi de donner lieu à des crachements aux balais ; en pratique, heureusement, la tension entre les lames du collecteur

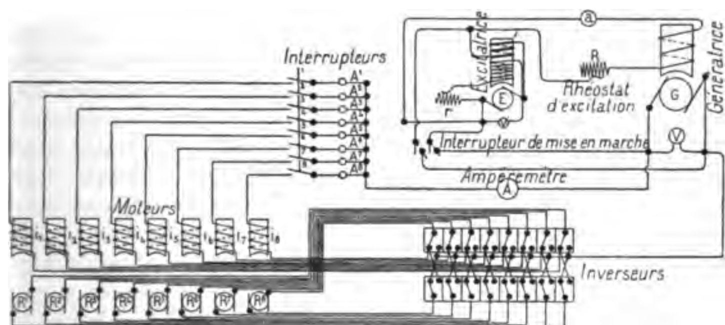


Fig. 574. — Schéma de la régulation de la locomotive automotrice Heilmann.

s'abaisse en même temps que le champ, ce qui réduit la tendance aux étincelles. M. Ward Leonard affirme même qu'il n'y a jamais de feu au collecteur. Il est permis de croire cependant que sur les rampes, lorsqu'il faut un courant double ou triple du courant normal et un champ très faible, les conditions de marche seraient absolument critiquables si l'on n'avait soin de ralentir la vitesse en augmentant l'excitation.

On évite plus sûrement toute difficulté à cet égard en modifiant la méthode précédente : au lieu de faire varier l'excitation de la génératrice à vitesse constante, on peut, en effet, maintenir l'excitation de la génératrice D_2 constante et faire varier la vitesse en agissant sur l'excitation de la réceptrice D_1 au moyen du rhéostat R_1 ; on parvient ainsi à réduire le champ à une valeur aussi faible qu'on le veut tout en gardant un champ inducteur normal assez puissant pour assurer toujours une commutation aussi parfaite qu'on peut le

désirer ; ce dernier dispositif est donc irréprochable et nous insisterons plus loin sur ses nombreux avantages.

M. Heilmann a adopté pour sa locomotive automotrice la méthode ainsi modifiée, suivant le schéma de la figure 574. Pour assurer à sa machine à vapeur un rendement maximum à toute charge, il en maintient, en effet, la détente fixe à couple sensiblement constant et en fait varier seulement la vitesse.

Cette variation se réalise à peu près automatiquement de façon à maintenir le courant constant. En effet, le couple résistant qu'exerce le courant sur l'induit de la dynamo est, d'après la formule (21) (t. II, p. 73), proportionnel au produit du champ par le courant ; le couple moteur restant à peu près constant [1], le courant doit l'être également.

Cela posé, la régulation se fait, comme le montre schématiquement la figure 574, en agissant sur le champ magnétique de la génératrice à l'aide d'un rhéostat d'excitation ; si l'on réduit le champ, la dynamo s'accélère, et l'augmentation de sa force électromotrice entraîne une augmentation de vitesse des moteurs. On remarquera que, si l'effort résistant offert à la marche de la locomotive est constant, il suffit d'une très faible variation du courant inducteur pour produire de grandes variations de vitesse ; il faut, par suite, un rhéostat réglé avec beaucoup de soin d'après les courbes caractéristiques de la génératrice.

Cette méthode dispense de couper le courant principal et réalise l'économie maxima ; mais elle donne peu de stabilité de marche sous charge variable : par exemple, si l'effort de traction est doublé par l'arrivée sur une rampe, le courant devient lui-même sensiblement double et par suite aussi le couple résistant de la dynamo génératrice ; le couple moteur de la machine à vapeur réglée à détente fixe étant, au contraire, sensiblement constant, celle-ci ralentirait indéfiniment sa marche si l'on n'avait soin d'agir immédiatement sur l'admission.

Analyse de la méthode de régulation Heilmann. — La remarque précédente montre que la vitesse de la locomotive n'est pas, comme on l'a dit trop souvent, indépendante de celle de la machine à vapeur, mais qu'elle est liée avec elle pour chaque valeur de l'admission par une fonction complexe, qu'il est intéressant d'analyser avec plus de détails.

Appelons Φ le flux inducteur de la dynamo génératrice, N le nombre de fils de l'induit, I le courant qu'elle envoie aux moteurs, $C_{\alpha,n}$ le couple moteur sur l'arbre de la machine à vapeur sous une admission α et à la vitesse n, couple qui varie un peu dans les limites d'emploi (généralement en décroissant), quand la vitesse n augmente C_p le couple résistant dû aux pertes d'énergie parasites

[1] En fait, cette constance du couple à détente fixe n'existe que dans de très étroites limites de vitesse, par suite des avances de la distribution et du laminage de la vapeur. Ce raisonnement n'est donc qu'approximatif.

de la dynamo, sensiblement constant pour une valeur donnée de l'excitation ; on a, pour l'équilibre de marche de la génératrice, l'équation

$$C_{\alpha,n} = \frac{N \Phi I}{2\pi} + C_p,$$

d'où

$$I = \frac{2\pi}{N} \frac{C_{\alpha,n} - C_p}{\Phi},$$

avec

$$E = Nn\Phi.$$

1° Tant que l'effort résistant à la jante des roues ne varie pas, il en est de même du courant ; si donc, tout en conservant même admission, on réduit par le rhéostat d'excitation le flux Φ dans un certain rapport, la vitesse augmente dans un rapport incomparablement plus grand et jusqu'à ce que la réduction du couple moteur $C_{\alpha,n}$ qui en résulte spontanément par le laminage de la vapeur, etc., soit suffisante pour rétablir l'égalité précédente sans modifier I.

Le flux Φ changeant très peu, on peut admettre que la f. é. m. de la dynamo et par suite la vitesse des moteurs varient à peu près comme la vitesse de la machine à vapeur. On peut donc, à résistance constante, régler la marche du train sans toucher à l'admission, par une variation très faible de l'excitation.

Plus le couple de la machine à vapeur varie lentement par l'effet d'un changement de vitesse (condition de bon rendement moyen), moins on aura de stabilité d'allure ; heureusement, la résistance opposée par l'air au mouvement de la locomotive varie assez vite en fonction de la vitesse pour accroître artificiellement cette stabilité.

2° La question est plus compliquée lorsque la résistance au mouvement change par suite du profil de la ligne, ce qui entraîne un changement correspondant du courant absorbé par les moteurs.

Algébriquement, les équations précédentes sont toujours, quel que soit I, susceptibles d'une solution sans modification d'admission par une simple variation de Φ et de n. Il suffit, en effet, de faire

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Phi = 2\pi \dfrac{C_{\alpha,n} - C_p}{NI}, & (50) \\ n = \dfrac{EI}{2\pi\,(C_{\alpha,n} - C_p)}, & (51) \end{array} \right.$$

ce qu'on obtient en réduisant l'excitation lorsque le courant demandé augmente, c'est-à-dire sur les rampes, et en l'accroissant au contraire aux descentes ; cette règle, qui peut sembler paradoxale, est analogue à celle donnée précédemment pour la régulation des moteurs par la méthode du shunt.

Pour faire travailler la chaudière d'une façon constante, on devrait se rapprocher de la régulation à puissance uniforme, c'est-à-dire maintenir le produit EI aussi constant que possible en accélérant sur les paliers et sur les pentes, et ralentissant sur les rampes ; les équations précédentes montrent qu'on n'aurait qu'à régler le champ Φ par un régulateur centrifuge commandé par la machine à vapeur de manière à maintenir l'allure de la génératrice à peu près constante. Mais, pour conserver aux trains une vitesse commerciale

suffisante, il faut renoncer aux très forts ralentissements qu'exigerait cette solution et accepter la nécessité d'accroître la puissance sur les rampes en augmentant le courant, ce qui risquerait de produire des étincelles aux balais si l'on ne renforçait l'excitation ; ce renforcement exige un accroissement du couple moteur et par suite une modification de l'admission de vapeur dès qu'il s'agit de grands écarts de puissance.

On peut représenter et étudier ces conditions de régulation par une méthode graphique en construisant sur une même épure le faisceau de droites qui exprime les variations de vitesse des moteurs des essieux en fonction des f. é. m. et des courants, et d'autre part, relevant expérimentalement sur la dynamo à vapeur les courbes représentant pour diverses valeurs constantes de l'admission la loi de variation de la f. é. m. E en fonction du courant (courbes que nous regrettons de ne point posséder). Ces deux séries de lignes, étant rapportées aux mêmes coordonnées (f. é. m. et courants), indiqueront par coïncidences les régimes d'admission correspondant à chaque régime des moteurs ; en marquant pour chacune les limites de variation de courant admises, on pourra en déduire les variations d'excitation à réaliser et établir le rhéostat d'excitation en conséquence.

En pratique, le mécanicien, qui se trouve dans la cabine d'avant, a sous la main les deux leviers d'admission et d'excitation. Au départ, il met en marche la dynamo à vapeur au moyen d'un courant envoyé de l'excitatrice par l'interrupteur I, qu'il ouvre aussitôt que la machine à vapeur a démarré. Il n'arrête ensuite la machine qu'aux stationnements et sur les longues descentes. Pour les démarrages, il ferme les circuits des divers moteurs par les interrupteurs correspondants du tableau, met le rhéostat d'excitation à un cran tel que la f. é. m. soit très réduite et ferme l'admission à moitié environ ; les moteurs démarrent, et il augmente peu à peu l'excitation et l'admission pour accélérer leur allure jusqu'à ce que la vitesse normale soit atteinte.

Une fois le train lancé et l'admission réglée à la valeur moyenne qui correspond à la charge du train, le mécanicien n'y touche plus guère et manœuvre seulement le levier du rhéostat.

L'arrêt s'obtient par une manœuvre inverse de celle de la mise en vitesse, et ensuite en coupant le courant par le commutateur de changement de marche qu'on place au point mort ; puis on bloque les freins Westinghouse à la manière ordinaire.

Le changement de marche se fait de même, mais en poussant le commutateur dans la position de renversement de marche.

Méthode des accumulateurs à groupements variables. — C'est surtout sur les voitures de tramways à accumulateurs qu'on a été amené à appliquer la régulation à potentiel variable. On peut la réaliser aisément en modifiant le nombre des éléments en série (*Faure*, 1881) ; mais il faut avoir soin de décharger toujours également les divers éléments pour éviter les complications qu'entraîneraient des recharges inégales et des détériorations de plaques ; on

est ainsi conduit à diviser la batterie en un certain nombre de groupes qu'on emploie simultanément dans les mêmes conditions.

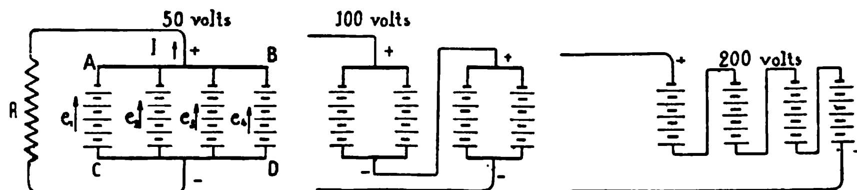


Fig. 575. — Combinaisons d'une batterie divisée en quatre parties.

Cette méthode, indiquée d'abord par *Reynier* (1883), a été généralement appliquée en divisant la batterie en 4 parties groupées successivement suivant les trois schémas de la figure 575, c'est-à-dire par 4 en série, par 2 en série et 2 en parallèle, et enfin par 4 en parallèle.

On obtient ainsi trois f. é. m. variant dans la proportion 1 : 2 : 4 et par suite des vitesses graduées sensiblement dans la même proportion.

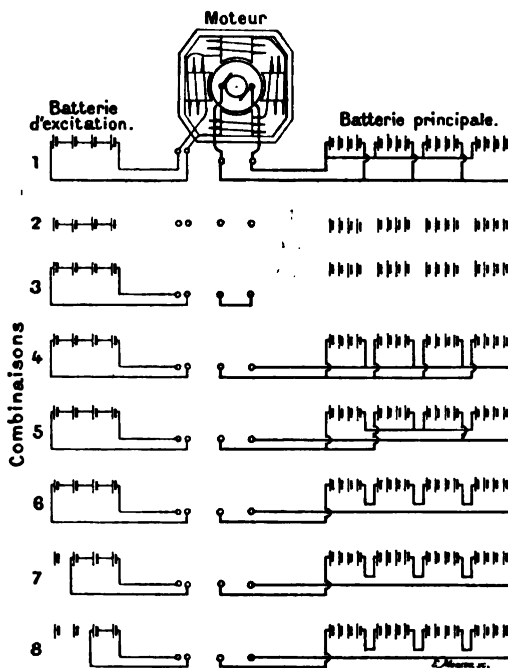


Fig. 576. — Application des trois combinaisons de la figure précédente à la régulation d'une voiture à accumulateurs de la Cie Schuckert, avec l'aide d'une variation d'excitation dans les positions 7 et 8.

Les automobiles à accumulateurs de Bruxelles (1885), New York (1886), Birmingham (1890), Scheveningen (1891), Paris-Saint-Denis (anciennes voitures) (1892), Berlin et Hagen (1895), Vienne (1896), New York (Madison avenue) (1896) ont été ainsi disposées. A Paris, par exemple, on a divisé la batterie en 4 groupes de 27 éléments donnant environ 50 volts en circuit fermé [1].

[1] A Paris, on a employé l'excitation en série, puis l'excitation en dérivation (voiture Bourdon); à Vienne et à Hagen, on préfère exciter les inducteurs à part par une petite batterie spéciale.

On ne peut évidemment employer avantageusement dans ce cas l'excitation dérivée et il faut la remplacer par une excitation séparée, qui permet d'autre part de réaliser la variation du champ par modification du nombre des éléments, ainsi que le montre la figure 576.

Ce système de couplage variable est rationnel, parce qu'il évite d'une part les dépenses inutiles d'énergie et de l'autre le travail excessif des accumulateurs au démarrage; en mettant les 4 groupes en parallèle, on peut, en effet, sans accroître leur régime de décharge individuel, disposer d'un courant 4 fois plus fort qu'à grande vitesse avec 4 groupes en tension. Mais le couplage des batteries en parallèle présente l'inconvénient que le courant de décharge ne se partage pas toujours également, tant s'en faut, entre les divers groupes. Cet effet, analogue à l'inégale répartition des courants entre deux moteurs en parallèle (t. II, p. 117), provient de la même cause, c'est-à-dire de la faible résistance intérieure des appareils.

Considérons par exemple (fig. 575) les 4 groupes en parallèle ayant des f. é. m. à peu près égales e_1, e_2, e_3, e_4; appelons r_1, r_2, r_3, r_4 leurs résistances intérieures, également très voisines de l'égalité, i_1, i_2, i_3, i_4 leurs courants, U la différence de potentiel entre les deux barres communes AB et CD, R la résistance extérieure et I le courant total. On a :

$$I = \frac{U}{R},$$

$$i_1 = \frac{U - e_1}{r_1},$$

$$i_2 = \frac{U - e_2}{r_2},$$

$$i_3 = \frac{U - e_3}{r_3},$$

$$i_4 = \frac{U - e_4}{r_4}.$$

Pour que le rendement des batteries soit bon, on leur donne, comme on le sait, une résistance intérieure assez faible pour que la perte de charge ri en régime normal ne soit qu'une faible fraction (2 à 4 p. 100) de la f. é. m. e; le voltage moyen aux bornes ne diffère donc ici que de 2 à 4 p. 100 de la moyenne de la f. é. m. Une différence accidentelle de 2 à 4 p. 100 entre deux d'entre elles, provenant, par exemple, de la sulfatation d'un ou deux éléments du groupe ou de toute cause analogue, suffira donc à établir une différence de 100 p. 100 entre leurs courants.

M. Darrieus[1], qui a particulièrement attiré l'attention des ingénieurs sur ce phénomène, en a donné une démonstration très nette en prenant au hasard dans une même fourniture 10 éléments semblables en apparence, dont il a formé deux groupes, l'un de 5 en série et l'autre de 5 en parallèle, qu'il a déchargés au même régime, c'est-à-dire en choisissant les résistances extérieures de façon que la densité de courant à la surface des plaques fût la même dans les deux groupes (0,5 ampère par dm^2 de plaque dans ses expériences). On aurait dû obtenir dans les deux cas la même énergie aux bornes, puisque $5\, e \times i = e \times 5\, i$; au contraire, on a trouvé de cette manière une différence de 13 p. 100 entre les watt-heures fournis par les deux groupes de 5 éléments, l'avantage appartenant au groupe en tension. Pour rendre l'expérience plus convaincante, on a interverti les rôles des deux groupes, et cette fois les 5 éléments en tension ont présenté une supériorité de 23 p. 100 en énergie fournie.

Il peut ainsi arriver qu'un des groupes soit presque inactif ou même que les autres se déchargent sur lui ; au lieu d'un régime de décharge prévu sagement à 2 ampères par kilogramme, par exemple, on pourrait donc avoir en réalité 4 ou 5 ampères ; d'où une réduction considérable du rendement, une détérioration plus rapide des batteries et la nécessité de recharger inégalement les éléments, ce qui n'est pas possible lorsque des batteries sont disposées à demeure dans les voitures.

Divers ingénieurs en ont conclu qu'il fallait proscrire tout groupement en parallèle ; mais c'est là, croyons-nous, une exagération : il peut, en effet, très bien se faire que des éléments *isolés* aient de notables différences de f. é. m. ; mais la loi des probabilités montre que cette inégalité doit tendre à s'annuler lorsque le nombre des éléments de chaque groupe est choisi assez grand ; il suffit alors, pour maintenir une suffisante égalité, de remettre toujours tous les groupes en série pour les recharger et d'éliminer promptement tout élément qu'un accident quelconque aurait détérioré. Il est seulement raisonnable de restreindre le nombre des batteries à deux. Cette méthode a, du reste, fait ses preuves pratiques dans plusieurs installations récentes, notamment à Hanovre ; dans cette application, la batterie est de 208 éléments, et l'égalité des deux groupes de 104 éléments est assez satisfaisante pour qu'on n'ait constaté jusqu'ici aucun inconvénient du genre de celui que nous venons de signaler.

Méthode des accumulateurs en série. — Une autre méthode qui a été proposée[2] et qu'on pourrait employer aussi pour faire varier la tension d'alimen-

[1] *L'Électricien*, 18 et 25 août 1894.

[2] Cf. W. M. Baxter Jun., *Electrical World*, 24 avril 1897.

tation aux bornes du moteur consiste dans l'emploi, sur les voitures alimentées par conducteur extérieur, d'une batterie d'accumulateurs en série avec les moteurs ; suivant le sens dans lequel on la mettrait, on augmenterait ou on diminuerait la f. é. m. disponible : par exemple, une batterie de 200 volts sur un réseau à 500 volts permettrait de fonctionner à volonté sous 300,500 ou 700 volts. Mais ce système est peu pratique, car il exige, pour une simple question de régulation, une batterie relativement très importante, comparable à celles des voitures automotrices ; d'autre part, les charges et les décharges, ne s'équilibrant pas automatiquement, exigeraient beaucoup d'attention de la part du mécanicien.

III. — Choix entre les diverses méthodes de régulation

Les conditions de la comparaison pouvant être assez différentes suivant qu'il s'agit de voitures alimentées du dehors ou de voitures automotrices, il convient de séparer ces deux cas.

Voitures à alimentation extérieure. — La méthode la plus rationnelle, celle de la variation du potentiel, ne peut, d'après ce qui précède, être employée que fort exceptionnellement, dans certains cas spéciaux que nous avons indiqués ; nous n'en parlerons donc plus ici.

Toutes les autres méthodes ont été, sauf celle de la variation du bobinage de l'armature, l'objet de nombreuses applications dont nous donnons plus loin avec détails les exemples les plus caractéristiques. Il est donc possible aujourd'hui de juger leurs mérites respectifs en tenant compte des résultats pratiques fournis par l'expérience.

1° *Au point de vue de la simplicité*, l'avantage appartient sans conteste à la méthode du rhéostat ; c'est pourquoi celle-ci a joui d'une si grande faveur et est, aujourd'hui encore, employée par les constructeurs qui débutent dans la traction. Les rhéostats sont robustes et peu dispendieux ; en multipliant les touches, on peut graduer la vitesse avec une précision indéfinie ; enfin, le démarrage se fait sans difficulté et avec la plus grande douceur.

Les méthodes de commutation ou de changement de couplage nécessitent l'emploi de commutateurs, engins assez délicats et qui doivent être construits avec une grande précision, surtout dans le cas des couplages variables, pour éviter la formation d'arcs

et la mise en court-circuit intempestive des moteurs lorsqu'on passe de la marche en série à la marche en parallèle. La méthode de Sprague est particulièrement compliquée à cause des nombreux conducteurs qu'elle exige. Ces méthodes ne peuvent dispenser complètement de l'emploi d'un rhéostat, au moins pour le démarrage; mais il est juste d'ajouter que ce rhéostat est beaucoup plus petit et par suite moins coûteux et plus facile à loger que dans la première méthode, où il est l'organe unique et essentiel et où il a besoin de touches plus nombreuses.

2° *Au point de vue de la bonne gradation des efforts et des vitesses*, la méthode la plus parfaite est celle de la variation d'excitation par shunt ou rhéostat d'excitation, avec rhéostat de démarrage, qui donne une gradation aussi douce qu'on le désire et permet de modifier ainsi les puissances aussi bien que les vitesses. La méthode série-parallèle à deux moteurs seulement ne donne qu'une gradation médiocre, car, sous peine de la compliquer beaucoup, on ne peut employer plus d'une seule résistance dans les shunts ; mais elle s'applique remarquablement bien aux lignes à fortes rampes ou aux lignes suburbaines où l'on a besoin de marcher à deux vitesses variant sensiblement du simple au double; avec quatre moteurs au lieu de deux, elle pourrait donner une gradation beaucoup plus parfaite.

3° *Au point de vue économique*, la méthode du rhéostat est ruineuse, puisqu'on doit intercaler des résistances dans tous les cas où un ralentissement est nécessaire et à tous les démarrages. Plusieurs ingénieurs ont eu depuis longtemps la curiosité d'évaluer l'augmentation qui en résulte pour la dépense moyenne d'énergie; M. W. Dierman, par exemple, l'a mesurée en déterminant à divers régimes l'intensité du courant, le voltage aux bornes des moteurs et le voltage du réseau, à l'aide d'une série de lectures à intervalles réguliers et suffisamment rapprochés[1] ; il a trouvé ainsi une dépense moyenne de 292 watts-heures par voiture-kilomètre, dont 124, soit 42 p. 100, consommés par le rhéostat; au démarrage, celui-ci consomme la moitié environ de l'énergie absorbée. Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre XIII.

[1] Aujourd'hui, on emploie de préférence pour ces mesures les compteurs d'énergie portatifs du Prof. Elihu Thomson dont nous parlons plus loin (p. 390).

La méthode Sprague paraît moins désavantageuse à première vue, puisqu'elle règle par commutation de bobines ; mais celles-ci jouent, comme nous l'avons dit, aux faibles vitesses, le rôle de rhéostat et la perte d'énergie correspondante est bien plus gênante, au point de vue de l'échauffement qu'elle produit, dans le moteur que dans une résistance extérieure. Si l'on tient compte du rhéostat de démarrage, la commutation des bobines, bien qu'infiniment supérieure, pour de longs parcours sans arrêts, à la méthode précédente, entraîne dans un service de tramway à arrêts fréquents des pertes moyennes presque aussi fortes que celle-ci.

Au contraire, la méthode par changement de couplage, qui fait intervenir des forces électromotrices variables, réduit l'usage du rhéostat à fort peu de chose, ainsi que ses dimensions. La résistance n'intervient qu'au début du démarrage et pour adoucir la brusquerie des changements d'allure ; mais, en marche normale, soit à grande vitesse, soit à demi-vitesse, et même pendant une grande partie de la durée de l'accélération initiale, on profite du plein rendement. On peut se faire une idée de l'économie ainsi réalisée par des mesures expérimentales : les tableaux ci-contre résument, par exemple, les résultats très intéressants obtenus par M. Hale à Denver (Colorado) sur une même ligne et dans les mêmes conditions de charge, en employant comparativement la méthode du rhéostat et la méthode série-parallèle ; la pente maxima était de 1,7 p. 100 sur 136 m. ; le poids de la voiture, de 8 t. ; elle remorquait une voiture d'attelage.

L'économie qui ressort de ces expériences en faveur de la méthode série-parallèle est considérable ; en moyenne, elle n'est certainement pas inférieure à 30 p. 100.

Des essais intéressants effectués par M. Sever[1] sur les lignes du Coney Island and Brooklyn Railway confirment ces résultats et même les accentuent. Par exemple, dans le parcours de Fulton Ferry à la 9e rue, la dépense a atteint 611 watts-heures par tonne avec le rhéostat contre 327 avec le régulateur série-parallèle K ; de même, dans le parcours inverse, 595 watt-sheures contre 331 ; de le 9e rue au Boulevard, 495 contre 378, et dans le parcours inverse,

[1] *Electric Power*, 1894, p. 439.

461 contre 267, etc. L'économie atteint donc aisément 30 à 40 p. 100, sans compter la diminution de la perte en ligne.

ÉCONOMIE D'ÉNERGIE RÉALISÉE PAR L'EMPLOI DE LA MÉTHODE SÉRIE-PARALLÈLE SUR UNE LIGNE DE TRAMWAY ORDINAIRE

Méthode de régulation employée	Durée du parcours	Nombre de voyageurs	Nombre d'arrêts	Courant moyen	Tension moyenne du courant	Puissance moyenne	Courant de démarrage moyen	Courant maximum	Vitesse moyenne en kilomètres à l'heure	Dépense d'énergie par voiture-kilomètre
				amp.	volts	chev.	amp.	amp.	kilom.	w-h.
Rhéostat	1 h. 10 m. 32 s.	61	98	32,4	448	19,5	73,0	120	14,9	970
Méthode série-parallèle	1 h. 9 m. 40 s.	60	98	22,0	465	13,7	32,3	85	15,3	675

ÉCONOMIE OBTENUE DANS DIFFÉRENTES CONDITIONS DE MARCHE

Méthode de régulation et régime utilisé	Courant moyen pendant les 14 premières secondes du démarrage	Courant moyen pendant un parcours complet, démarrage non compris	Tension moyenne	Puissance moyenne	Vitesse en kilomètres à l'heure	Dépense d'énergie par voiture-kilomètre
	ampères	ampères	volts	chevaux	kilomètres	watts-h.
Méthode du rhéostat, 2 moteurs en parallèle. . . .	36,6					
avec résistance.		22,0	410	12,0	13,2	678
sans résistance		25,1	398	13,3	20,2	485
avec inducteurs shuntés.		39,8	385	20,4	24,2	630
Méthode série-parallèle . .	18,3					
2 moteurs en série . . .		12,8	440	7,5	15,3	365
1 seul moteur		13,5	410	7,4	16,4	333
2 moteurs en parallèle .		30,8	430	17,7	24,7	532

C'est naturellement au démarrage que le bénéfice est le plus sensible. A priori, il suffirait d'un courant moitié moindre pour produire le même couple total avec la seconde méthode qu'avec la première; mais l'intervention des régimes intermédiaires, qu'on fait défiler successivement en tournant la manette au fur et à mesure

de l'accélération de la vitesse, modifie un peu ces proportions. Pour avoir une idée nette de ce qui se passe dans les deux cas entre la première poussée et la mise en pleine vitesse d'une automobile, nous avons fait les calculs qu'on trouvera au chapitre XIII dans la théorie du démarrage; à défaut de ces calculs, on peut se faire une idée des résultats obtenus par la figure 577, publiée par la General Electric Co. et qui représente en fonction du temps les valeurs successives du courant; chaque point anguleux des courbes provient d'un changement de position de la manette du rhéostat dans l'un des cas et du régulateur dans l'autre. Au bout de 18 secondes, les deux procédés réalisent la même combinaison, c'est-à-dire le couplage des deux moteurs en parallèle, et la même vitesse (celle-ci atteint son régime normal au bout de 25 secondes); mais, dans la méthode du rhéostat, le courant part de 80 ampères et dépasse 100 ampères à un certain moment, tandis que, dans la méthode série-parallèle, il part de 50 ampères seulement et ne dépasse pas 65 ampères.

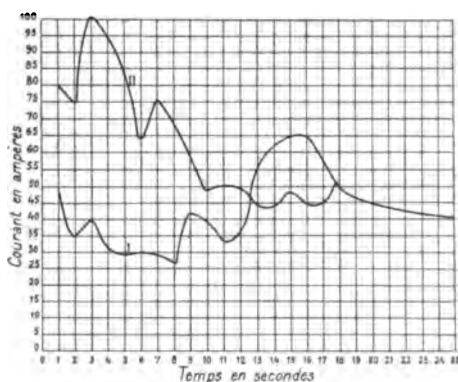


Fig. 577. — Comparaison entre les démarrages obtenus par la méthode du rhéostat (courbe II) et par la méthode série-parallèle (courbe I). Courbes de courant en fonction du temps, à la tension de 500 volts.

Le courant moyen pendant les 18 premières secondes, calculé en planimétrant le diagramme, est de 42,9 amp. avec la deuxième méthode, au lieu de 62,4 avec la première, ce qui constitue une réduction de 31 p. 100. L'économie en énergie ε pour un démarrage est, d'après cela, en admettant une tension de 500 volts,

$$\varepsilon = 19^{a},5 \times 500 \text{ volts} \times \frac{18^{s}}{3\,600} = 50 \text{ watts-heures environ.}$$

En admettant qu'on ait en moyenne 5 arrêts par kilomètre, ce qui n'a rien d'exagéré sur un tramway, on réalise ainsi un bénéfice de 1/4 de kilowatt-heure par voiture-kilomètre.

Il est à remarquer que le bénéfice ne s'arrête pas là, car la diminution du courant consommé permet de réduire dans la même proportion le débit des génératrices et par suite les frais de premier établissement de la station centrale. C'est là un résultat d'une importance trop manifeste, semble-t-il, pour qu'il y ait lieu d'y insister davantage; cependant, bien des ingénieurs, ne considérant que le prix de revient de l'énergie, sont portés à croire que la dépense de courant n'intervient que pour une faible part dans les frais d'exploitation; ils oublient ainsi que l'intérêt et l'amortissement du capital engagé dans les installations fixes sont, en réalité, proportionnels à la dépense moyenne de courant par voiture et que la plus petite réduction de cette dépense entraîne une économie corrélative considérable ou permet d'étendre les services desservis par l'usine.

Conclusions. — Il n'y a donc pas à hésiter sur le choix de la régulation toutes les fois qu'on dispose de deux moteurs : la méthode série-parallèle est celle qui donne la solution la plus économique et la plus rationnelle. Une seule considération peut faire hésiter à l'adopter, celle du patinage au démarrage[1]. Mais heureusement l'adhérence dont on dispose est, en général, plus que suffisante pour le démarrage des automobiles. Il n'y a qu'un cas où il y ait lieu de se préoccuper sérieusement de cette difficulté, c'est celui des locomotives ayant à remorquer des trains très lourds et à arrêts très peu fréquents; là, il y a quelque intérêt à conserver toujours le couplage en parallèle, et, comme la vitesse entre stations est sensiblement constante, le rhéostat n'a à intervenir qu'aux démarrages. Au contraire, sur les lignes métropolitaines desservies par locomotives, aussi bien que sur celles équipées avec des voitures automobiles, le réglage par couplage variable est nécessaire au point de vue économique, à cause de la fréquence des démarrages; aussi cette méthode a-t-elle été adoptée sur le chemin de fer aérien de Liverpool, sur la ligne souterraine de Budapest et sur tous les métropolitains américains, qu'ils soient exploités par locomotrices ou par trains d'automobiles.

[1] Cette question sera étudiée au chapitre XIII.

Quand il s'agit d'automobiles isolées munies d'un seul moteur, la méthode série-parallèle n'est plus applicable ; mais ce n'est pas un motif pour s'en tenir au simple rhéostat, car la méthode de réglage par l'excitation et en particulier la méthode du shunt permettent d'améliorer assez notablement le rendement; ce qui mériterait surtout d'être essayé dans ce cas particulier, c'est la méthode du double induit, qui jouit des propriétés désirées sans l'inconvénient du patinage et semble parfaitement applicable aux voitures de tramways à équipement simple.

Cas des voitures automotrices. — Nous ne reviendrons pas sur le cas très spécial de la locomotive Heilmann, pour laquelle le système à potentiel variable est éminemment rationnel, et nous nous occuperons seulement des voitures à accumulateurs.

Pour celles-ci, la question d'économie d'énergie prime toutes les autres, puisque le poids de la batterie doit être accru en proportion de l'énergie dépensée; la réduction du courant de démarrage au minimum est aussi particulièrement importante au point de vue de la conservation des plaques, qui exige une densité de courant limitée.

Dans les voitures à un seul moteur, la division de la batterie en deux moitiés nous paraît opportune à ce point de vue; elle donne deux vitesses économiques, allant du simple au double et qu'on ne pourrait obtenir autrement qu'en adoptant des induits à deux collecteurs. Les méthodes du rhéostat et du shunt, bien que d'un emploi facile, entraînent plus de pertes et font travailler les éléments à des régimes plus forts au démarrage.

Pour utiliser rationnellement la méthode de variation du champ, employée, par exemple, sur les nouvelles voitures des tramways de Paris et du département de la Seine, il faudrait réaliser la régulation à puissance constante, qui demande à la batterie toujours le même courant; M. Johannet avait appliqué ce système à la voiture d'essai de la Compagnie Générale des Omnibus (1893)[1]. Mais, comme nous l'avons montré plus haut, on est très limité dans cette voie. Aussi voit-on, par exemple, sur la ligne de Paris-Saint-Denis,

[1] *Revue industrielle*, 2 décembre 1893.

le débit, qui est normalement de 35 amp., s'élever à certains moments à 100 ou 120 amp. et même davantage, ce qui correspond à plus de 5 amp. par kilogramme de plaques. En admettant même qu'on soit maître de la variation du courant, cette régulation exige l'intervention constante du mécanicien, qui doit avoir un ampèremètre sous les yeux, et fait dépendre de sa surveillance la conservation de la batterie, ce qui est toujours une condition défavorable.

La division en demi-batteries est donc préférable.

Dans les voitures à deux moteurs, la méthode série-parallèle est tout indiquée et permet, à elle seule, de réduire de moitié le courant et la vitesse, en sorte que la division en deux de la batterie n'est plus aussi utile ; on peut cependant employer encore celle-ci avec avantage pour abaisser les pertes d'énergie pendant le démarrage, comme on l'a fait par exemple à New-York, à l'aide des dispositifs décrits plus loin ; cette solution permet d'atteindre pour les moteurs un courant de démarrage quadruple du courant normal sans modifier la densité de courant dans les accumulateurs.

§ 2. — Combinaisons accessoires de la régulation

On peut classer parmi les combinaisons accessoires et plus ou moins facultatives de la régulation l'inversion de marche, la récupération de l'énergie aux descentes par les moteurs et enfin l'emploi de ceux-ci comme freins.

Inversion de marche. — L'expression du couple (t. II, p. 72) indique que pour changer le sens de rotation des moteurs il suffit, quel que soit le mode d'excitation employé, d'intervertir soit le sens du courant dans l'induit, soit celui du flux inducteur en inversant le courant d'excitation.

Autrefois, lorsqu'on employait des balais en cuivre décalés en avant dans le sens du mouvement, il fallait, pour éviter de trop fortes étincelles, les déplacer en changeant le sens de rotation, de façon à leur faire occuper une position symétrique de la première par rapport à la ligne neutre, ou bien employer deux paires de balais décalés en sens opposé et qu'on appliquait à tour de rôle

au moyen de leviers. Ce système, imaginé par Reckenzaun, est abandonné depuis si longtemps qu'il est inutile de le décrire.

Aujourd'hui, grâce aux balais en charbon normaux au collecteur et aux champs intenses qui permettent de supprimer tout décalage, il n'y a plus à se préoccuper du collecteur lors des changements de marche.

Récupération de l'énergie. — Comme nous l'avons déjà rappelé plus haut (t. II, p. 77), les moteurs à excitation constante peuvent, sans changer de sens de rotation, fonctionner comme génératrices au lieu de servir de réceptrices, dès que, par suite d'une augmentation d'excitation ou de vitesse, ils produisent une force électromotrice supérieure à la tension du réseau. Ce fonctionnement est impossible pour les moteurs en série, parce qu'ils ne tournent pas dans le même sens comme génératrices que comme réceptrices; mais on peut encore arriver au même résultat en leur appliquant la méthode mixte indiquée plus haut.

L'excitation, dans ce cas comme dans le premier, est alors constante et le courant change simplement de signe, prenant la valeur

$$I' = \frac{E - U}{r} = \frac{Nn\,\Phi - U}{r}, \qquad (52)$$

où r est la résistance du moteur.

Le couple électromagnétique conserve aussi la même expression en devenant négatif. Quant à l'énergie récupérée dans l'unité de temps, elle a pour valeur

$$EI' = E\frac{E - U}{r}. \qquad (53)$$

Le rendement devient

$$\eta = \frac{2\pi n C'}{EI'}, \qquad (54)$$

en supposant le couple C' évalué en joules.

Pour accroître l'énergie récupérée lors des arrêts rapides ou pour réduire la vitesse des voitures, on trouve avantage à renforcer le plus possible l'excitation au moment opportun; cet effet s'obtient sans difficulté dans les méthodes de régulation par variation du champ; dans le cas de la méthode série-parallèle, on arrive au même but en mettant momentanément les moteurs en série.

Régimes d'un moteur marchant en récupération. — Les courbes de fonctionnement d'un moteur marchant en récupération sur une descente se déduisent aisément des courbes normales de fonctionnement du même moteur.

Prenons, par exemple, le moteur défini par les courbes de vitesse et de couple de la figure 578, en pointillé, et dont la résistance d'induit est 0,7 ohm.

La vitesse qu'il prendra se calcule facilement en fonction du courant en remarquant qu'à intensité égale I dans l'induit la perte de charge rI change

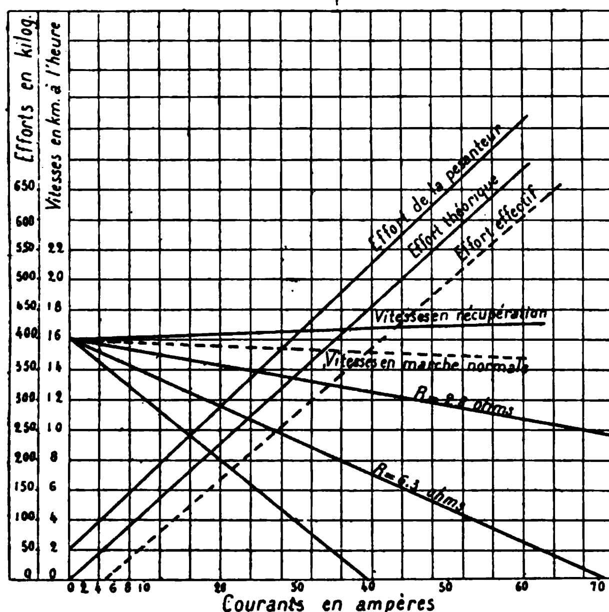


Fig. 578. — Relation entre les régimes de marche ordinaire et les régimes de récupération d'un moteur excité en dérivation.

de signe ; la vitesse en récupération n' est donc majorée par rapport à la vitesse en marche normale n correspondant à la même abscisse dans le rapport

$$\frac{n'}{n} = \frac{U + rI}{U - rI}. \qquad (55)$$

La vitesse n était représentée par une ligne pointillée tombant au-dessous de l'horizontale du point de départ ; la vitesse n' sera donc représentée par une ligne symétrique par rapport à cette horizontale. De même, les vitesses en marche avec des résistances en série de 2,8 ohms, 6,3 ohms, etc., étant représentées par des lignes plus tombantes (obtenues expérimentalement ou déduites de la précédente par le calcul), les vitesses en récupération avec les mêmes résistances seront figurées par des droites symétriques non tracées sur l'épure.

A courant égal, le couple extérieur C' que l'effet de la gravité doit produire à la jante des roues est égal au couple électromagnétique augmenté du couple de pertes C_p

$$C' = \frac{(U + rI)\,I}{2\pi n'} + C_p, \qquad (56)$$

tandis que, dans la marche normale, le couple mécanique utile à la jante des roues C_u est la différence du couple électromagnétique et des pertes

$$C_u = \frac{(U - rI)I}{2\pi n} - C_p,$$

les couples étant exprimés en joules. D'où l'on déduit, à courant égal,

$$C' - C_u = 2C_p + \frac{I}{2\pi}\left[\frac{U + rI}{n'} - \frac{U - rI}{n}\right] = 2C_p$$

$$= 2\left[\frac{U - rI}{2\pi n} I - C_u\right]. \qquad (57)$$

La ligne représentative de C_u est donnée ; on trace facilement la droite qui représente

$$\frac{U - rI}{2\pi n} I ;$$

il suffit de reporter au-dessus de cette droite les différences entre ses ordonnées et celles de la courbe de couple C_u pour obtenir la nouvelle courbe de couple C'. Sur la figure, les forces étant exprimées sous forme d'efforts de traction F en kilogrammes, l'équation (57) est remplacée par l'équivalente

$$F' - F = 2\left[\frac{(U - rI)I}{\frac{V \times 9,81}{3,6}} - F\right], \qquad (58)$$

V étant la vitesse en kilomètres à l'heure.

On obtient de cette manière les courbes supérieures représentées en traits pleins.

Ces courbes montrent l'influence du courant à vide qui ne permet de récupérer que sur des pentes assez fortes ; nous reviendrons d'ailleurs sur ce sujet au chapitre XIII. Il faut tenir compte, en outre, de la puissance absorbée pour l'excitation (ici 2 ampères), qui se retranche de la puissance récupérée ; l'origine de l'échelle des abscisses doit être en conséquence reculée de 2 ampères vers la droite, comme l'indique la figure.

Emploi des moteurs comme freins. — Bien que la question du freinage doive être traitée en détail au chapitre XIV, nous ne pouvons quitter l'étude de la régulation sans parler de l'application des moteurs à la production d'un arrêt rapide ; cette question rentre en effet dans la régulation par le fait qu'il s'agit encore de combinaisons d'induits, d'inducteurs et de rhéostats, et nous la considérerons ici seulement à ce point de vue, pour rendre plus intelligibles les exemples donnés plus loin au paragraphe 3.

En ce qui concerne les moteurs excités en série, cette application peut se faire de deux manières :

1° *Freinage par inversion de marche.* — On peut faire machine en arrière de même que par la marche à contre-vapeur sur les locomotives, en inversant le couple moteur, comme nous venons de le dire; mais alors la force électromotrice de la dynamo, au lieu de se retrancher, s'ajoute à celle du réseau de distribution et tend à produire une intensité de courant exagérée ; celle-ci donne lieu à un arrêt trop violent, en même temps qu'elle peut endommager le moteur si l'on n'a soin d'intercaler dans le circuit une très forte résistance.

Soit U la force électromotrice du réseau, E celle du moteur, r sa résistance; l'intensité est,

$$\text{en marche ordinaire, } I = \frac{U - E}{r},$$

$$\text{en marche en arrière, } I' = \frac{U + E'}{r},$$

qui diffère peu de $\frac{2U}{r}$.

Pour un moteur qui consomme, par exemple, en marche normale 30 ampères sur un réseau à 500 volts, avec une résistance intérieure de 1,3 ohms à chaud, le courant deviendrait au moment de l'inversion

$$I' = \frac{1\,000}{1,3} = 770 \text{ ampères},$$

tandis que la limite pratique pour ce moteur est d'une soixantaine d'ampères.

Il faudra donc ajouter au moment de l'inversion une résistance de 15 à 20 ohms capable de supporter un courant à 60 ampères et par conséquent très volumineuse ; le couple freinant du moteur dépendra alors uniquement de l'intensité admise.

Mais cette solution exige l'emploi d'un rhéostat supplémentaire coûteux et elle entraîne sur la ligne une dépense inutile d'énergie de $500 \times I'$ joules par seconde. En outre, elle n'est pas sûre, parce que toute rupture de communication entre le trôlet et la ligne la rend inefficace. Elle peut même entraîner de graves accidents dans le cas où des voyageurs, effrayés par l'approche du danger qui motive l'arrêt brusque, sauteraient à terre par la plate-forme arrière, car, aussitôt arrêtée, la voiture repart en sens inverse, au risque de les écraser.

Le freinage par inversion de marche n'est donc pas à recommander, même avec adjonction de résistances ; on ne doit jamais l'adopter sur une ligne nouvelle et il ne saurait être toléré qu'en cas de danger extrême sur les voitures dépourvues d'autre mode de freinage électrique.

2° *Freinage par mise en court-circuit.* — Les inconvénients précédents disparaissent si l'on supprime au moment du freinage l'arrivée du courant de ligne, tout en fermant l'armature et l'inducteur en court-circuit sur des résistances ; celles-ci sont encore nécessaires pour éviter une intensité de courant exagérée et permettre de graduer l'action du frein, mais le rhéostat de démarrage suffit ici à cet objet, puisque la force électromotrice du moteur ne dépasse pas celle de la ligne.

Le moteur, dont l'armature se trouve mise en mouvement par l'essieu à l'aide des engrenages qui les solidarisent, devient générateur en s'excitant lui-même et débite du courant dans le rhéostat. Soient R la résistance en circuit et E la force électromotrice de la dynamo à l'instant t; un travail

$$\frac{1}{R}\int E^2\,dt$$

est produit par celle-ci et transformé en chaleur dans le rhéostat aux dépens de la force vive de la voiture [1]. Une méthode analogue à celle indiquée plus haut pour l'étude de la récupération nous permettra d'examiner avec détails au chapitre XIV les régimes que prennent les moteurs pendant le freinage avec des résistances variables.

A la rigueur, on pourrait se dispenser d'introduire un rhéostat, mais le court-circuit risquerait alors de donner lieu à un arrêt très brusque et à un échauffement exagéré du moteur.

Cette méthode de freinage repose, comme on le voit, sur l'auto-excitation du moteur. Celle-ci se produit sans artifice spécial pour le moteur excité en dérivation, qui conserve sans changement le champ magnétique existant au moment où l'on fait l'inversion. Mais il n'en est pas de même pour le moteur en série; il ne suffit plus

[1] Un travail supplémentaire est absorbé sous forme de pertes dans le moteur.

alors de fermer le circuit du moteur tel qu'il est disposé en marche normale, car le courant qu'il produirait dans ces conditions tendrait à détruire l'aimantation des inducteurs au lieu de la renforcer; il faut donc avoir soin d'inverser en même temps les connexions entre l'induit et l'inducteur, tout comme pour le changement de marche.

Lorsque l'équipement d'une voiture comporte deux moteurs en série, la manœuvre est analogue. Dans le cas où les moteurs restent toujours couplés en parallèle d'une façon invariable (fig. 579) on peut se contenter, tout en interrompant l'arrivée K du courant, d'inverser les connexions entre les induits et les inducteurs[1], comme le montre la figure 580. Les deux moteurs sont alors disposés de façon à produire, par leur magnétisme rémanent, des forces électromotrices e, e' dirigées en sens opposé au courant I qui les parcourait. Par suite de la petite différence qui existe toujours entre les champs magnétiques de ces deux moteurs, l'une des forces électromotrices, e' par exemple, l'emportera sur l'autre e, et leur différence produira dans les deux moteurs, formant un groupement en série, un petit courant $i = \frac{e' - e}{R + 2r}$, qui inversera la polarité du moteur le plus faible.

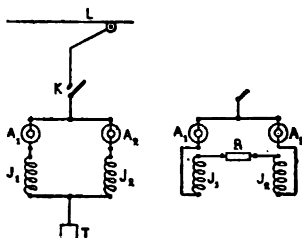


Fig. 579 et 580. — Changement de connexions pour le freinage par mise en court-circuit.

A partir de ce moment, les deux forces électromotrices étant de même sens, les moteurs s'amorceront rapidement et l'intensité du courant dans leur circuit commun prendra une valeur égale à celle que donnerait chacun fermé isolément sur lui-même.

Ce dispositif a été breveté par M. *Short*[2] et appliqué sur diverses lignes américaines. Il présente deux inconvénients : si les deux moteurs sont bien construits, la différence de leurs forces électromotrices est si petite que l'inversion de polarité du plus faible

[1] Certains auteurs ont exprimé l'opinion que la marche en parallèle des moteurs en temps normal assurait un freinage automatique en cas de rupture du fil de ligne ou de déraillement du trôlet; cela n'est vrai que si l'on dispose d'un inverseur et que le mécanicien ait la consigne de s'en servir dans ce cas; sinon, il n'y a pas amorçage.

[2] Brevet américain nº 474031, 3 mai 1892.

ne peut être produite ou tout au moins demande un temps assez considérable pour rendre le freinage tardif; ensuite, en cas d'accident à l'un des moteurs, l'autre ne peut fonctionner, puisque leur circuit est commun.

Il vaut beaucoup mieux mettre séparément les deux moteurs en court-circuit sur eux-mêmes ; la période d'amorcement est alors très courte et chacun des moteurs fait frein pour son propre compte.

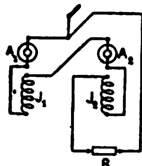


Fig. 581. — Autre mode de connexion pour la mise en court-circuit.

On peut aussi, comme l'a indiqué M. *Bonta*[1], mettre les deux moteurs *en série* au moment où on les ferme en court-circuit et où l'on intervertit les connexions, comme le montre la figure 581. Les deux f. é. m. sont alors de même sens dès le début.

Nous n'insisterons pas ici sur les inconvénients du freinage par les moteurs seuls, qui seront indiqués au chapitre XIV ; ils ne peuvent, en dehors du cas où le profil des lignes rend possible une sérieuse récupération d'énergie, permettre de considérer ce procédé autrement que comme un frein de secours, auquel les freins magnétiques excités par les moteurs sont bien préférables.

§ 3. — Appareils employés pour la régulation

Régulateurs. — D'après ce qui précède, on voit qu'il faut, en général, pour effectuer la régulation, un rhéostat et un commutateur multiple ou « régulateur[2] », permettant de réaliser instantanément les diverses combinaisons de circuits. Il y a lieu d'y ajouter

[1] Brevet français, 1895.

[2] En anglais « controller », c'est-à-dire gouverneur, régulateur. C'est un contresens ridicule de traduire ce mot en français par l'expression de « contrôleur », qui correspondrait à l'anglais « comptroller » et s'applique déjà à l'agent chargé du contrôle des recettes aux stations. Les exemples de mots français qui ont changé de sens en passant en anglais sont assez nombreux pour qu'on doive se méfier de ces réimportations, d'ailleurs parfaitement inutiles. De même, pour désigner celui qui manœuvre le régulateur, nous rejetterons l'absurde mot de « wattmann » qu'on emploie quelquefois et qui n'appartient à aucune langue; ce n'est pas un néologisme, mais un « snobbisme ». La véritable traduction du terme américain « motorman », c'est « machiniste » ou « mécanicien », termes que le simple bon sens indique d'ailleurs suffisamment, si l'on ne veut pas employer celui de « conducteur ».

un inverseur pour le changement de marche et au besoin la mise en court-circuit. Le commutateur et l'inverseur peuvent d'ailleurs être et sont généralement confondus ou réunis dans un même appareil, qui prend encore le nom de « régulateur ».

Les organes du régulateur sont contenus dans une caisse en tôle, fixée sur la plate-forme; une ou deux manettes faisant saillie hors de la boîte permettent de les manœuvrer de l'extérieur; sur les voitures destinées à circuler dans les deux sens, il y a en général deux régulateurs pareils couplés en parallèle par rapport aux divers circuits, ce qui permet de faire la régulation de l'une ou l'autre plate-forme. Les manettes du régulateur doivent être retirées et emportées par le mécanicien chaque fois qu'il quitte la plate-forme où il se tenait. Les câbles pénètrent dans la boîte par une ouverture située à la partie inférieure et aboutissent aux bornes d'un petit tableau de connexions placé à l'intérieur; celui-ci porte deux interrupteurs qui permettent d'isoler l'un ou l'autre moteur en cas d'avarie.

Dans quelques matériels équipés en dehors des règles ordinaires, on rencontre des régulateurs dont certaines parties sont placées sous le plancher (fig. 582 et 585).

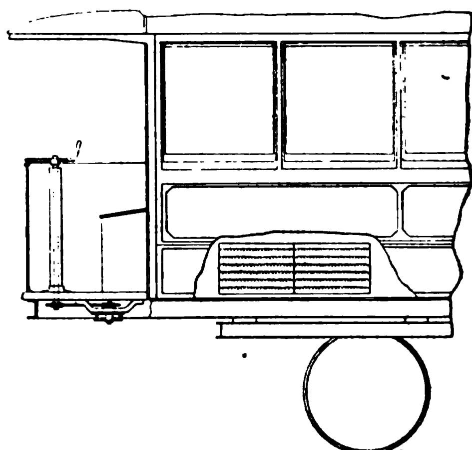
Nous allons examiner dans ce qui suit, avec plus de détails, la construction des divers organes des régulateurs et appareils accessoires qui figurent dans l'équipement des voitures.

Rhéostats. — La première condition que doivent remplir les rhéostats, c'est de présenter sous le plus faible volume possible une grande résistance et un pouvoir refroidissant suffisant. En outre, quand on doit faire varier la résistance en circuit, il faut ajouter aux rhéostats une série de connexions aboutissant à des touches sur lesquelles un levier peut venir faire contact à volonté en des points variables. Il y a avantage à faire varier la section des différentes parties proportionnellement au courant qu'elles auront à supporter.

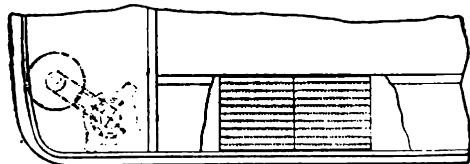
Dans l'industrie, on dispose, pour construire ces appareils, de moyens variés : boudins en fil de fer ou de maillechort, toile de fer, barres de charbon, cuves électrolytiques, etc., et l'on peut, en général, leur affecter une place suffisante pour en assurer la ventilation complète. Les mêmes conditions se rencontrent sur les

locomotives électriques à châssis spacieux : c'est ainsi qu'on a, par exemple, employé des boudins en fil de fer sur les locomotives du City and South London Ry., décrites plus haut, et un rhéostat à liquide très ingénieux sur la locomotive d'essai du P.-L.-M.

Mais sur les voitures de tramways il n'en est plus de même : d'une part, on est à peu près obligé de renoncer aux résistances en charbon qui se briseraient et aux résistances liquides qu'il serait difficile de rendre étanches[1] ; d'autre part, on ne dispose que d'espaces fort restreints pour loger les rhéostats et l'on doit, par conséquent, en réduire beaucoup le volume ; enfin, l'énergie à absorber pour le réglage et surtout lors des démarrages étant, en général, très considérable, il faut accepter des échauffements élevés, et construire les rhéostats de façon qu'ils n'aient rien à craindre de la chaleur et ne puissent causer d'incendie.



Élévation.



Plan.

Fig. 582. — Disposition du rhéostat à boudins et du commutateur électrique à touches des nouvelles voitures de Paris-Saint-Denis.

Les résistances en boudins, qui sont très encombrantes lorsqu'on veut les disposer convenablement, ne sont plus guère employées que par quelques sociétés européennes. Ces boudins sont généralement constitués par des fils en acier étamé groupés dans une caisse qu'il est bon de tapisser de matières incombustibles et qu'on place au-dessous de la voiture, sur le toit ou sous les banquettes (fig. 582).

Sur tous les réseaux américains et les lignes européennes équi-

[1] On verra cependant plus loin que la maison Kummer a fait quelques applications des résistances liquides sur les voitures de tramways.

pées avec des matériels analogues, on a depuis longtemps remplacé ces appareils par des rhéostats plus compacts, construits d'après un tout autre principe. Celui-ci consiste à former le rhéostat de substances incombustibles ramassées dans un espace restreint



Fig. 583. — Ancien rhéostat à touches Thomson-Houston (1889).

et pour lesquelles on admet un échauffement assez considérable; le circuit résistant est constitué, en général, par des lames de fer empilées ou enroulées les unes sur les autres, avec interposition d'un isolant incombustible tel que le mica ou l'amiante, et dans lesquelles le courant circule alternativement dans un sens et dans l'autre pour réduire au minimum la self-induction et, par suite, les étincelles de rupture.

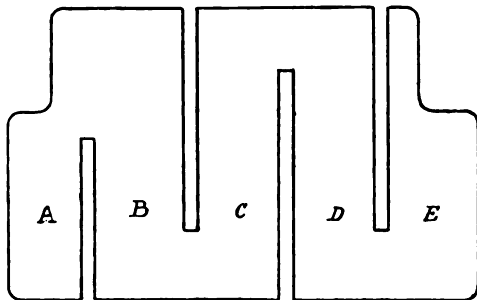


Fig. 584. — Découpage des tôles du rhéostat Thomson-Houston.

Le rhéostat à touches de l'ancienne Compagnie *Thomson-Houston*, de forme circulaire ou semi-circulaire (fig. 583), était formé d'une sorte d'auge cylindrique en fonte dans laquelle étaient empilées verticalement des feuilles de tôle mince alternant avec des feuilles de mica. Chaque feuille de tôle de 75 × 100 mm. était découpée suivant la forme représentée par la figure 584, de façon à allonger le parcours du courant, qui arrivait par l'une des extrémités A ou E et sortait par l'autre; les lames voisines étaient en contact deux à deux alternativement par leurs extrémités A ou E et séparées sur tout le reste de leur

surface par une mince feuille de mica. De cette manière, le courant était obligé de parcourir successivement toutes les lames de gauche à droite et de droite à gauche alternativement. Ces lames étaient maintenues en place par deux demi-cercles en fer qui pressaient (avec interposition de mica) sur les épaulements ménagés en A et E. L'ensemble était isolé de l'auge servant d'enveloppe par des plaques de mica et d'ardoise. Des plaques plus épaisses en fonte, ayant la forme de coins pour rattraper l'inégalité de longueur des circonférences intérieure et extérieure de l'auge cylindrique, dépassaient les autres de 1 à 2 cm. et leurs

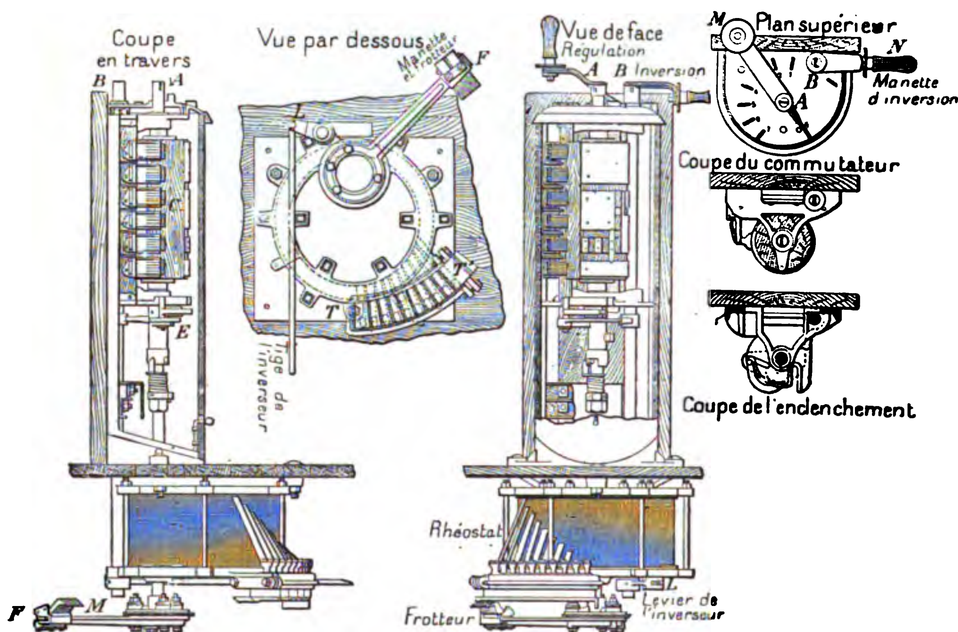


Fig. 585. — Ancien régulateur à rhéostat de Parshall (1891).

arêtes supérieures renforcées servaient de touches de contact pour la prise de courant, effectuée par un frotteur en laiton.

Ce rhéostat pouvait supporter 60 amp.; sa résistance était de 20 ohms.

Un autre modèle de la même compagnie, représenté avec le régulateur correspondant par la figure 585, consistait en une série d'anneaux circulaires plats découpés dans des tôles minces, fendus suivant un rayon et empilés les uns au-dessus des autres avec interposition de plaques de mica de manière à former un cylindre compact. Chaque anneau communiquait avec le suivant par une de ses extrémités et le courant circulait alternativement dans les sens dextrorsum et sinistrorsum de façon à réduire la self-induction au minimum [1]. L'épaisseur de ces plaques variait d'ailleurs rationnellement suivant leur position dans

[1] M. Parshall a fait à ce sujet une expérience très intéressante (*Proc. Inst. of. El. Eng.*, New-York, 19 avril 1892) : un rhéostat de ce genre, composé de 400 plaques ayant 30 cm. de diamètre, 15 cm. de hauteur et 25 mm. d'épaisseur radiale, présentait une

le cylindre, celles qui devaient rester peu de temps en circuit et supporter de faibles courants étant les plus minces et celles qui devaient supporter des courants prolongés et intenses étant au contraire les plus épaisses. On prenait sur ce rhéostat des résistances variables à l'aide d'un bras de contact mobile muni d'un sabot frottant sur des touches en fer, reliées à différents points du cylindre par des connexions en cuivre et isolées par de l'ardoise et du mica.

Des dispositions analogues étaient adoptées à la même époque par tous les autres constructeurs américains; la forme seule différait. Lorsque l'on combinait l'emploi d'un rhéostat à touches avec un commutateur pour les bobines de champ, on avait soin de commander les deux appareils par un seul et même levier, comme le montre la figure 585, où le commutateur est en haut et le rhéostat en bas.

Avec les méthodes récentes, il n'est pas, en général, nécessaire de diviser la résistance en plus de 3 ou 4 parties, ce qui simplifie beaucoup les connexions; il n'y a plus alors besoin de touches de contact spéciales et les connexions aboutissent directement au commutateur, comme on le verra plus loin. Les figures 586 et 587 représentent, par exemple, les rhéostats employés aujourd'hui par la *General Electric Co.* et par la Compagnie *Westinghouse* pour la régulation série-parallèle. Les *Ateliers d'Oerlikon* emploient des types tout à fait similaires.



Fig. 586. — Rhéostat K de la General Electric Company.

Tous ces rhéostats doivent à leur mode de construction une parfaite incombustibilité : on peut les maintenir sans détérioration pendant plusieurs heures à la température du rouge sombre. Néanmoins, on recommande avec raison de ne pas leur faire dépasser

self-inductance de 40 millihenrys lorsque ses plaques formaient une spirale continue et de 8,5 millihenrys seulement lorsqu'on les divisait en 12 spirales enroulées alternativement en sens contraire.

150°. Pour éviter qu'il puisse s'établir des arcs entre les tôles, il est bon que la différence de potentiel entre deux plaques voisines ne dépasse pas 10 volts. La section de chaque partie doit être proportionnée au courant correspondant. Pour plus de sûreté, ces

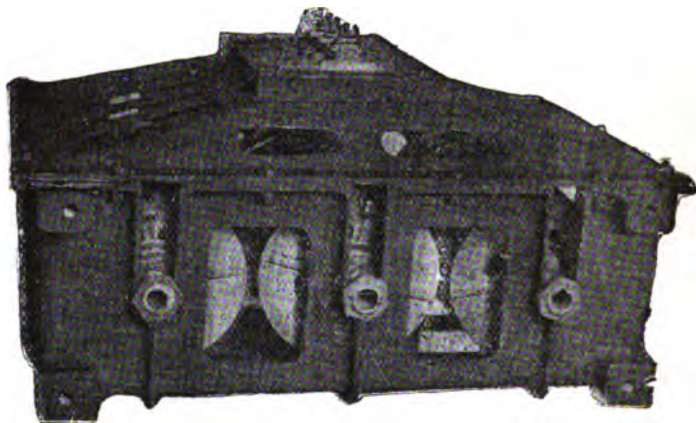


Fig. 587. — Rhéostat n° 7 de la Westinghouse Electric Company.

rhéostats, généralement placés en dessous du plancher, en sont séparés par une tôle et une feuille de carton d'amiante.

Les rhéostats de la Compagnie *Westinghouse* et ceux de la Compagnie *Walker*, construits d'une façon analogue, sont formés de grands rubans de tôles enroulés avec interposition d'amiante ;

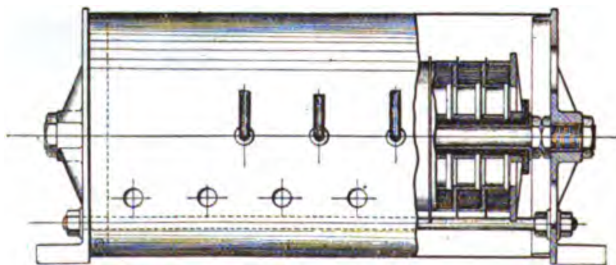


Fig. 588. — Mode de construction d'un rhéostat Westinghouse.

ils sont divisés en un certain nombre de bobines semblables, interchangeables et portées par des mandrins en fonte enfilés sur un ou deux boulons fixés à l'enveloppe ; cette disposition, dont la figure 588 montre les détails, favorise le refroidissement, facilite

les réparations et permet de réaliser à peu de frais un nombre quelconque de divisions.

Les radiateurs électriques décrits plus haut (t. I, p. 394) peuvent aussi, grâce à leur incombustibilité et à leur bonne émission de la chaleur, constituer des rhéostats de tramways. D'intéressantes applications en ont été faites par la Société du *Familistère de Guise*, qui emploie de préférence à cet usage des plaques rectangulaires de 0,89 à 1 m. de longueur et 0,15 m. de hauteur pouvant facilement trouver place sous la voiture.

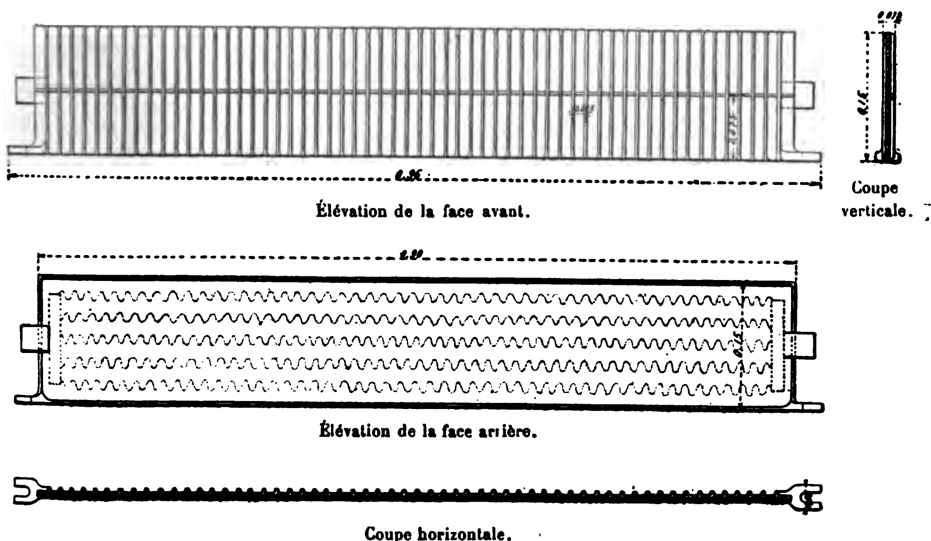


Fig. 589. — Plaque unitaire d'un rhéostat du type « radiateur » de la Société du Familistère de Guise.

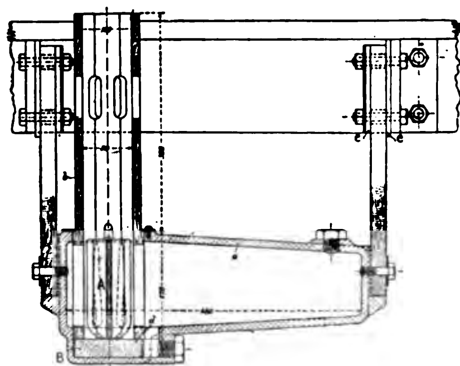
La figure 589 montre un élément d'un de ces rhéostats, en fonctionnement sur une voiture à deux mises en marche à 550 volts. Chaque appareil est composé de neuf plaques semblables de 0,900 × 0,150 × 0,010 m., placées verticalement et espacées de 14 mm. Les 18 plaques, qui n'occupent pas plus de 0,50 m. de largeur, sont placées sous le plancher dans une caisse ajourée de 0,98 × 0,55 × 0,17 m. Chaque rhéostat a six prises de courant, correspondant aux 6 touches de la manette; entre les cinq premières touches, il y a deux plaques en série; entre les 3 dernières, une seulement; le courant peut ainsi varier de 25 à 55 amp.; la résistance maxima est d'environ 10 ohms. Chaque rhéostat pèse 7 × 9 = 63 kg., a une surface totale de 9 × 13,5 = 122 dm² et peut dissiper 120 watts par dm². Le calcul s'en fait d'ailleurs suivant les principes exposés plus haut (t. I, p. 395). L'avenir permettra de juger ce système.

Sur des voitures à quatre moteurs, la même Société a placé 50 pla-

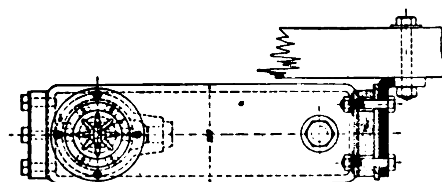
ques de 1 kw. (9 amp. × 110 volts), ayant 0,30 × 0,30 m. et qu'on intercale successivement par groupe de 5 en tension.

Les difficultés d'emploi des résistances liquides signalées plus haut ne sont pas insurmontables. Quelques constructeurs, notamment la Société *Kummer*, en font usage et s'en déclarent satisfaits.

Le rhéostat liquide de cette maison, représenté par la figure 590, se compose d'un récipient en fonte *a*, dans lequel s'adapte un cylindre *b* en matière isolante, percé à sa partie inférieure d'ouvertures pour la circulation du liquide.

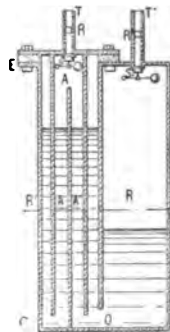


Coupe verticale.

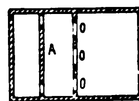


Plan.

Fig. 590. — Rhéostat à liquide de la Société Kummer.



Coupe verticale.



Coupe horizontale.

Fig. 591. — Rhéostat à liquide basé sur le principe des vases communiquants.

Ce cylindre empêche les trop grands mouvements de la solution de carbonate de soude dont est rempli le récipient et sert de guide à un plongeur en plomb A, qu'on descend plus ou moins à l'aide d'une corde et qui vient à fin de course reposer sur une plaque de plomb B. Cet appareil, facile à démonter, se fixe sous la voiture avec interposition de lames d'ébonite.

Sur les voitures où l'on dispose d'air comprimé pour la manœuvre des freins, on pourrait employer des rhéostats liquides établis suivant le principe de la figure 591. Un réservoir RR' en fonte, relié à l'un des pôles du circuit, est formé de deux compartiments communiquant par de larges orifices O,O ; celui de gauche R' est muni d'un certain nombre d'ailettes A venues de fonte et fermé par un couvercle portant d'autres ailettes profondes A', qui s'inter-

calent entre les précédentes ; ce couvercle, relié à l'autre pôle du circuit, est séparé du récipient par une garniture étanche et isolante E. On remplit les deux compartiments à moitié d'une solution de soude ou de potasse. Deux tuyaux T et T', pouvant être mis à volonté en communication soit avec le réservoir d'air comprimé, soit avec l'atmosphère, permettent de faire passer le liquide de l'un à l'autre de ces compartiments : par exemple, lors du démarrage, on fait passer peu à peu le liquide du compartiment R dans le compartiment R' pour offrir un passage de plus en plus conducteur au courant ; une soupape automatique S empêche le liquide de déborder lorsque le réservoir R' est plein ; puis, on met les deux pôles en court-circuit à l'extérieur; pour l'arrêt, on fait le mouvement inverse. Un semblable appareil est économique et ne peut s'échauffer au delà de 100°, température limitée par l'ébullition; l'entretien se réduit à remplacer de temps en temps l'eau évaporée.

Inverseurs. — Pour changer le sens de la marche d'un moteur, il suffit, comme nous l'avons dit, d'intervertir le sens du courant

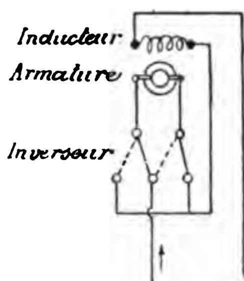


Fig. 592. — Principe de l'inverseur de marche.

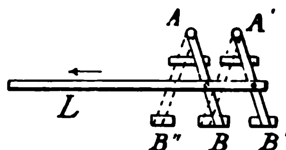


Fig. 593. — Construction d'un inverseur plan.

dans l'inducteur ou dans l'induit ; en général, c'est sur l'induit qu'on opère, parce qu'il présente une self-induction moindre que celle de l'inducteur.

Le schéma de la figure 592 représente le dispositif le plus simple pour réaliser l'inversion d'un moteur ; les deux balais de l'induit aboutissent à deux plots, en face desquels s'en trouvent trois autres servant l'un à l'entrée du courant et les deux autres, qui sont réunis ensemble, à sa sortie, ou inversement. Selon qu'on établit les connexions suivant les traits pleins ou suivant les traits pointillés, le courant traverse l'induit dans un sens ou dans l'autre, tandis qu'il garde le même signe dans les inducteurs. Les deux manettes de commutation peuvent être simplement reliées par un levier en matière isolante, non représenté, formant avec elles un

parallélogramme articulé; mais ce dispositif est défectueux, parce que toutes les fois qu'on fait ainsi arriver le courant par les axes de pièces mobiles il se produit de mauvais contacts et des étincelles; il est préférable de placer les axes en dehors des 5 plots, comme le montre la figure 593, où L est le levier de manœuvre isolé. Dans les voitures à deux moteurs, le même levier actionne deux inverseurs semblables placés côte à côte. Au lieu de faire pivoter les manettes, on peut aussi les déplacer parallèlement, comme le montre la figure 594, qui se rapporte à un modèle d'inverseur de MM. *Claret* et *Vuilleumier*.

Les inverseurs les plus employés comportent pour chaque

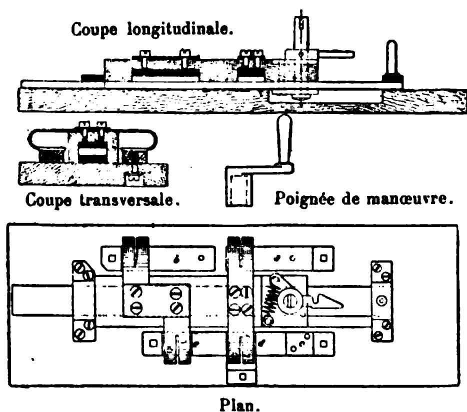


Fig. 594. — Inverseur plan Claret-Vuilleumier.

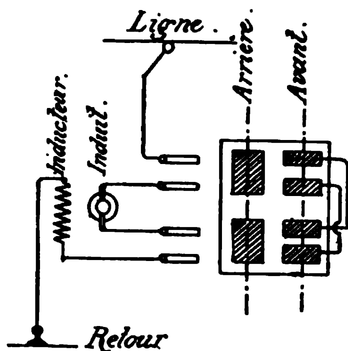


Fig. 595. — Développement d'un inverseur cylindrique.

moteur 6 plots disposés sur un cylindre à axe vertical, dont la figure 595 représente le développement; 4 balais, communiquant avec l'induit et les inducteurs, frottent sur le cylindre et, lorsque ce dernier tourne autour de son axe vertical, viennent successivement en contact avec les deux séries de plots en cuivre dont les connexions sont indiquées. Suivant que les contacts se font sur la génératrice avant ou sur la génératrice arrière, le courant dans l'induit va du balai supérieur au balai inférieur ou inversement.

Il va sans dire qu'il y a bien d'autres dispositifs admissibles pour ces inverseurs, simples commutateurs à deux directions.

Comme règle de prudence, rappelons qu'on ne doit jamais les manœuvrer qu'après avoir coupé le courant.

Quand l'excitation est faite en dérivation, il est plus simple d'inverser le courant dans les inducteurs, groupés invariablement en série et excités séparément pour les motifs indiqués plus haut (t. II, p. 122) ; il faut d'ailleurs avoir bien soin d'exciter les inducteurs avant d'envoyer le courant principal et d'éviter toute rupture de leur circuit. L'inverseur représenté par la figure 596 paraît répondre convenablement à ces desiderata; il excite, en effet, les inducteurs au moment de la mise en marche en avant ou en arrière et les ferme en court-circuit sur une résistance avant de les détacher du réseau.

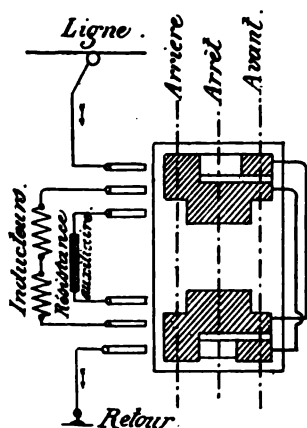


Fig. 596. — Inverseur pour moteurs excités en dérivation avec rhéostat de mise en court-circuit.

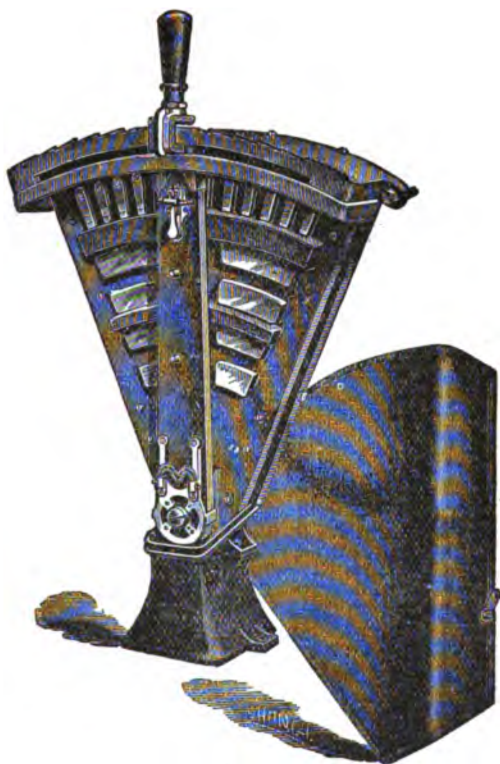


Fig. 597. — Régulateur Wightman à commutateur plan.

Commutateurs. — Les commutateurs, ou plutôt combinateurs, ayant pour but de réaliser des changements de connexions nombreux et complexes entre les divers circuits ou portions de circuits des moteurs et des rhéostats, sont plus ou moins compliqués dans le détail, suivant le mode de régulation employé; mais le principe

de leur construction reste simple : il consiste à fixer sur un support isolant une série de plots ou de barres reliés par des connexions convenables et par rapport auxquels on déplace des balais ou frotteurs. Les frotteurs peuvent être mobiles et les plots fixes, comme dans les anciens types ; l'inverse a lieu dans les régulateurs modernes ; dans les deux cas, c'est toujours aux organes fixes qu'on fait aboutir tous les fils des circuits à combiner, et les organes mobiles n'ont pour but que d'établir des ponts variables entre les premiers.

Deux formes différentes ont été employées pour le support des

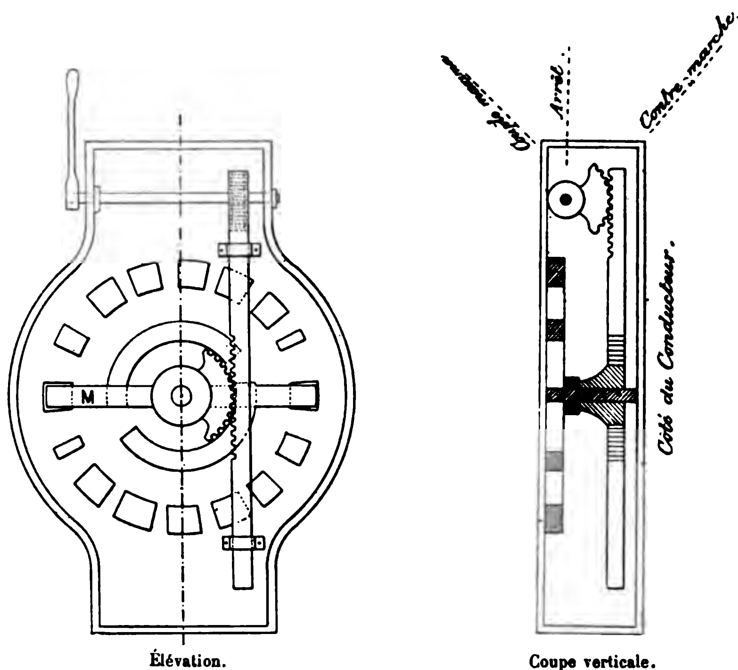


Fig. 598. — Régulateur de la Cie de l'Industrie Électrique à commutateur plan.

plots, la forme en disque, les plots étant alors des fragments d'anneaux circulaires plats, et la forme cylindrique, avec des plots constitués par des bagues cylindriques convenablement taillées. Le premier mode de construction n'est pratique que si l'on a un petit nombre de frotteurs : la figure 597 représente, par exemple, le régulateur plan *Wightman*, s'appliquant à la méthode de commutation, et la figure 598 le régulateur de la *Cie de l'Industrie Électrique* pour la méthode du simple rhéostat. Dans ce cas, le dispo-

sitif est très simple; mais quand on veut employer la méthode série-parallèle, la forme en disque présente trop de complication et ne donne pas toujours de bons contacts[1]. Aussi tous les types récents ont-ils la forme cylindrique (fig. 599) et celle-ci paraît

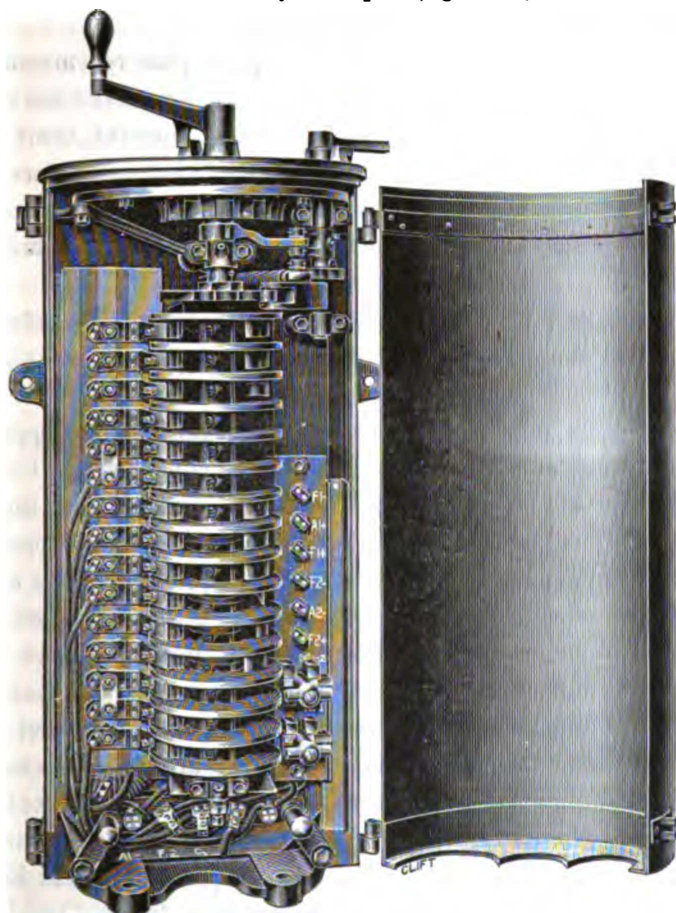


Fig. 599. — Régulateur à commutateur cylindrique (type Westinghouse n° 38 pour 2 moteurs de 50 chevaux).

devoir être adoptée partout. Le cylindre portant les plots tourne autour d'un axe vertical, tandis que les balais restent fixés à l'enveloppe extérieure.

[1] Reckenzaun a cependant appliqué un régulateur en disque à la méthode série-parallèle (*Electric Traction*, p. 114). On en verra un autre exemple plus loin dans les régulateurs des nouvelles voitures de Paris-St-Denis. Enfin, sur les voitures d'essai de l'État belge figure aussi un dispositif du genre Wightman (voir p. 255).

Dans quelques appareils anciens, tels que le régulateur des premières voitures à accumulateurs de la ligne de Paris-S[t]-Denis (fig. 675, p. 266), le cylindre porte des palettes venant s'engager entre des ressorts formant mâchoires; ce dispositif est excellent, mais malheureusement trop encombrant.

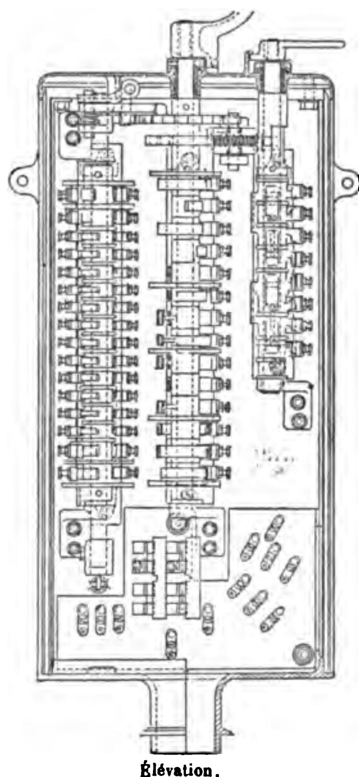
La maison *Siemens et Halske* a imaginé plus récemment un mode de construction original, tout différent des précédents et qui consiste (p. 248) dans l'emploi de leviers pouvant venir faire contact à leurs extrémités contre des plots fixes; ces leviers sont alignés verticalement les uns au-dessus des autres et commandés par des cames convenablement découpées et enfilées sur l'arbre de manœuvre.

On verra plus loin des exemples des combinaisons réalisées par les commutateurs, qui diffèrent suivant le procédé de réglage adopté.

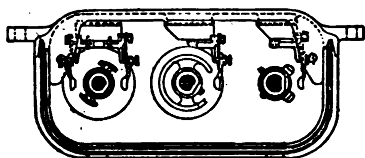
Une question importante pour la conservation de ces appareils est le choix des matériaux entrant dans leur construction. Comme support isolant on a employé le bois, puis divers isolants tels que la fibre, la vulcanite, l'ébonite, etc.; certains constructeurs, la Compagnie Westinghouse par exemple, ont même utilisé la porcelaine. Pour les plaques de contact et les frotteurs, on s'est servi pendant longtemps du laiton, conformément à l'usage ordinaire; mais on a reconnu que ce métal s'usait trop vite sous l'influence des étincelles de rupture qui se produisent surtout dans la méthode des couplages variables, et aujourd'hui l'on emploie plutôt le fer, qui s'use moins et assure de meilleurs contacts. La maison Siemens et Halske préfère les contacts en charbon, faciles à remplacer lorsqu'ils sont usés et qui ne peuvent fondre comme les contacts en métal; cette disposition donne d'excellents résultats.

La grande difficulté pratique que l'on a rencontrée a été surtout d'éteindre les arcs établis entre frotteurs et balais par les étincelles que produit la rupture des courants intenses auxquels on a affaire. Ces arcs jaillissant à 500 volts sont très persistants et endommageraient rapidement les appareils si l'on ne prenait quelques précautions supplémentaires : la *General Electric Co.* dispose à cet effet dans la boîte de ses régulateurs type K un puissant souf-

fleur électromagnétique du système du Prof. E. Thomson, formé d'une forte bobine parcourue par le courant principal et dont le noyau aboutit d'une part à l'enveloppe et de l'autre à une série d'ailettes en fer situées au droit des bagues de contact où se produit l'étincelle de rupture ; celle-ci est ainsi presque complètement annulée. La plupart des sociétés européennes ont imité ce système ; la figure 660 (p. 252) représente, par exemple, une disposition très pratique des *Ateliers d'Oerlikon*, dans laquelle l'électro est sur l'arbre même des régulateurs ; le circuit magnétique est aussi un peu différent de celui des régulateurs K (p. 236).



Élévation.



Coupe horizontale.

Fig. 600. — Régulateur Walker, type E, à 3 cylindres à ruptures multiples. A gauche, cylindre interrupteur à 32 contacts ; au centre, commutateur ; à droite, inverseur.

Ce soufflage ne serait pas suffisant pour empêcher les arcs de sauter d'un contact à l'autre et de s'établir ainsi entre les bagues voisines en mettant le trôlet à la terre, si l'on n'avait soin de fixer en outre entre les bagues de larges cloisons isolantes et incombustibles, par exemple en carton d'amiante, comme le montre la figure 599.

La Compagnie *Westinghouse*, qui n'a pas de souffleur, se contente de ces séparations et ajoute aux extrémités de ses frotteurs des lames de cuivre sur lesquelles se concentre tout l'effet destructeur et qu'il est facile de remplacer de temps en temps à peu de frais sans toucher au reste de l'appareil.

On a adressé au soufflage magnétique quelques critiques : la bobine prend de la place dans le régulateur et risque de s'échauffer beaucoup ; une rupture trop brusque de l'arc peut endommager les moteurs par surélévation de voltage. La Compagnie *Walker* a

fait valoir ces inconvénients, plutôt théoriques d'ailleurs et fort exagérés, pour préconiser un autre système d'extinction également ingénieux, qui consiste à interrompre le courant en plusieurs points à la fois. A cet effet, elle a employé d'abord un interrupteur automatique spécial (fig. 600) à 32 points de rupture (cylindre de gauche); puis elle a simplifié l'appareil en plaçant les touches correspondantes à la partie supérieure du cylindre principal (voir p. 248). Enfin elle ajoute maintenant aussi des souffleurs magnétiques d'un système particulier, formés de solénoïdes noyés dans les anneaux isolants qui séparent les segments du commutateur.

Quand les courants à commuter dépassent plusieurs centaines d'ampères, comme c'est parfois le cas sur les locomotives électriques, les arcs présentent plus d'intensité et l'on peut trouver avantage à augmenter le nombre des cylindres pour accroître les distances de rupture : la figure 601 représente, par exemple, un régulateur série-parallèle construit pour les locomotives Baldwin-Westinghouse à 2 moteurs de 100 chevaux; il comporte 3 cylindres, dont les 3 arbres sont commandés à l'aide de roues d'angle par un seul volant de manœuvre. La General Electric Co. a breveté, de son côté, en 1895, un appareil à 4 cylindres pouvant supporter 2 700 ampères[1].

On voit que les constructeurs américains ne reculent pas devant l'établissement de régulateurs série-parallèle pour des courants de 1 000 à 3 000 ampères. En Europe, où l'on semble s'être exagéré les difficultés de cette construction, on n'a pas osé l'aborder jusqu'ici et les ingénieurs qui ont établi des locomotives électriques puissantes ont préféré éviter la commutation de ces forts courants, comme on l'a vu plus haut (t. II, p. 161), au prix d'une complication de moyens qui peut aussi se justifier, dans une certaine mesure, par la plus grande élasticité de régime ainsi obtenue.

Dans le cas de trains comprenant de nombreuses automobiles, le moyen le plus simple pour réduire les courants à commuter, c'est de mettre un commutateur à chaque voiture.

[1] On trouvera une description complète de ce régulateur dans une Revue de M. Pellissier, *Éclairage Électrique*, t. III, p. 53; l'appareil, construit pour 6 moteurs et mû à l'air comprimé, comprend 4 cylindres enclenchés d'une manière assez compliquée et 2 disjoncteurs automatiques, l'un à maxima, l'autre à minima.

Servo-moteurs; manœuvre à distance. — Lorsque les régulateurs deviennent très considérables, on recourt souvent pour les

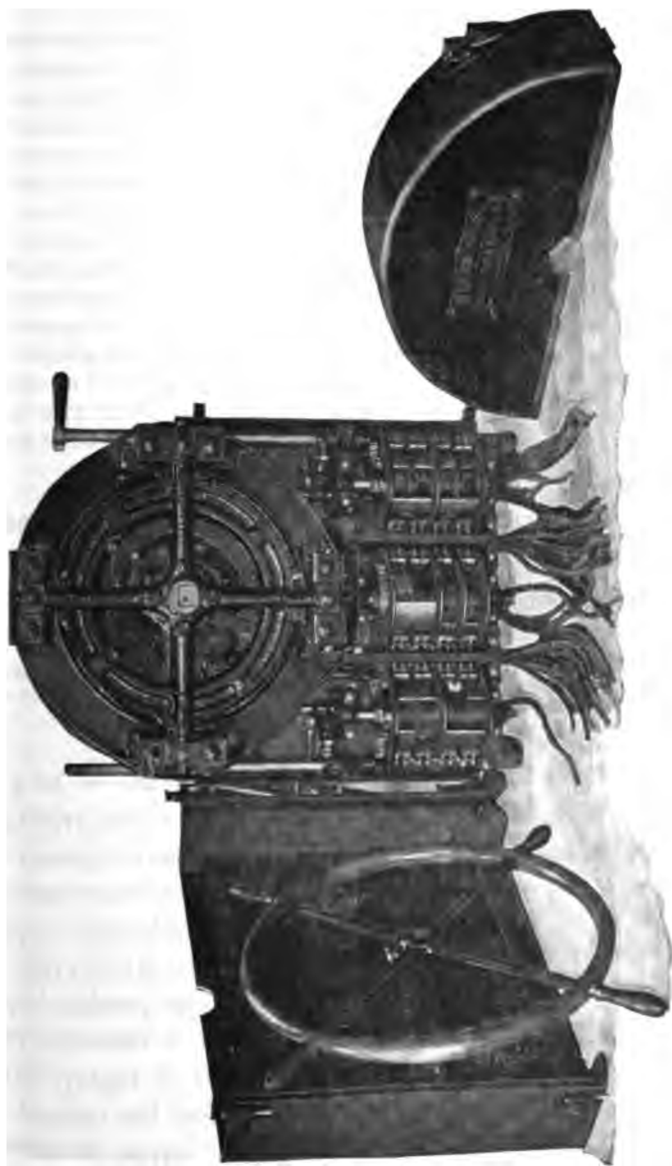


Fig. 601. — Régulateur série-parallèle, grand modèle, des locomotives Baldwin-Westinghouse.

manœuvrer à des servo-moteurs à air comprimé, qu'on peut employer aussi au soufflage énergique des arcs.

Comme exemple de ces servo-moteurs, nous citerons l'appareil qui a été employé sur l'« Intramural » de l'Exposition de Chicago et qui est représenté par la figure 602. Sur l'arbre O du commutateur est calée une roue dentée commandée dans un sens ou dans l'autre par deux crémaillères M et N, fixées à des pistons glissant dans deux paires de cylindres A,C et B,D ; l'un ou l'autre des cylindres A et B peut recevoir de l'air comprimé venant d'un réservoir par le robinet à trois directions K ; les cylindres C et D sont remplis d'huile, ainsi que la chambre F avec laquelle ils communiquent par deux tuyaux. Suivant la position de la manette L qui actionne le robinet K et un autre robinet placé entre C et F, on envoie de l'air comprimé, soit dans A, soit dans B, ou l'on supprime l'arrivée de cet air et l'on ferme en même temps la communication entre C et D, ce qui arrête tout mouvement. On peut donc, avec la plus grande facilité, faire tourner l'arbre O dans un sens ou dans l'autre ou bien l'immobiliser.

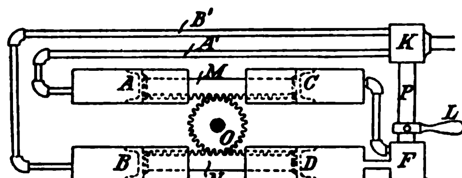


Fig. 602. — Servo-moteur à air comprimé pour la commande d'un régulateur puissant.

L'emploi des servo-moteurs est surtout nécessaire quand on adopte pour un train de plusieurs automobiles le système d'alimentation individuelle des voitures. Il faut alors pouvoir commander à la fois tous les régulateurs d'un même point du train ; c'est une question de manœuvre à distance, que nous traiterons avec plus de détails au paragraphe 4.

Combinaison du commutateur et de l'inverseur. — Au point de vue de la simplicité de la construction, il y a tout avantage à conserver le commutateur et l'inverseur sous forme d'organes séparés ; c'est pourquoi cette disposition est la plus généralement adoptée. Mais, en pareil cas, il faut éviter que l'inversion se fasse pendant le passage du courant, à cause des puissantes étincelles de rupture qu'elle occasionnerait sur les contacts : le seul moyen de forcer sûrement le mécanicien à rompre le circuit avant de manœuvrer l'inverseur est d'enclencher le levier qui commande ce dernier de façon qu'on ne puisse le déplacer que lorsque celui du commutateur est à l'arrêt.

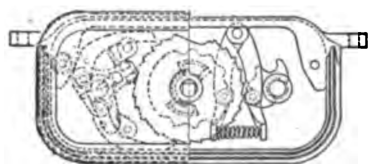


Fig. 603. — Enclenchements et encliquetage du régulateur Walker, type E.

La figure 603 donne un exemple de ces enclenchements entre cylindres commutateur et inverseur. Les deux arbres portent à leur partie supérieure des cames découpées dans lesquelles s'engagent des leviers. L'inverseur n'est libre que lorsque le commutateur est à la position zéro qui coupe le courant ; réciproquement, le commutateur est enclenché par l'inverseur de façon qu'on ne peut mouvoir sa manette que lorsque ce dernier est sur l'une des positions avant ou arrière. Un troisième enclenchement empêche de retirer la manette du commutateur avant qu'elle soit arrivée à la position zéro : c'est un simple ergot fixé au manche et auquel correspond une rainure dans le trou du plateau supérieur de la boîte.

Dans certains appareils, on s'est préoccupé de produire automatiquement le retour au zéro de l'un des deux arbres au moment où l'on passe d'une certaine position à une autre : par exemple, dans le régulateur Siemens, une résistance est introduite automatiquement lorsqu'on passe du couplage en série au couplage en parallèle ; dans le régulateur Walker dont nous venons de parler on manœuvre l'interrupteur en même temps qu'on ramène la manette du commutateur en arrière, etc. Ces mouvements automatiques s'obtiennent en ajoutant à l'arbre qu'on veut commander un *encliquetage*, qui le retient lorsqu'on fait avancer la manette de cet arbre dans un certain sens, mais qui est déclenché par le second arbre à un moment donné et laisse alors agir un ressort de rappel.

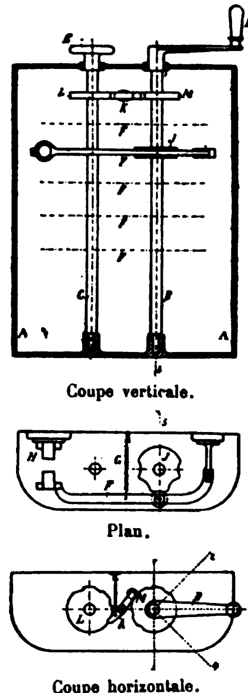


Fig. 604. — Schéma du régulateur de la Société Alsacienne, type Siemens.

Dans le régulateur *Siemens et Halske*, dont la figure 604 indique le principe, l'arbre C est ainsi rappelé par un ressort, non représenté, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, mais le cliquet K, qui s'engage dans les dents de la came L, le retient tant que la came M de l'arbre B ne l'a pas dégagé.

Le cylindre interrupteur du régulateur *Walker* (fig. 600 et 603) est commandé d'une façon analogue.

Il existe d'autres dispositifs plus complexes encore, notamment celui des voitures de Hanovre (p. 269), et le nouvel enclenchement magnétique Walker, où l'inverseur est verrouillé par l'armature d'un solénoïde traversé par le courant.

Pour les moteurs excités autrement qu'en série simple, il faut un enclenchement ne permettant au courant de passer dans l'induit que quand l'inducteur est excité.

Enfin, sur les voitures équipées suivant la méthode série-parallèle, on réalise une dernière espèce d'enclenchement entre l'arbre du commutateur et les interrupteurs de sûreté placés au bas du régulateur pour permettre de mettre l'un ou l'autre des moteurs hors circuit en cas d'avarie. Lorsqu'on ouvre un de ces interrupteurs, le manche qu'on soulève vient enclencher le cylindre et lui interdire de dépasser en avant ou en arrière une certaine position. Nous donnons plus bas des exemples de cette disposition.

Pour faciliter les enclenchements et mettre les deux leviers bien sous la main du mécanicien, il est bon de réunir commutateur et inverseur dans une même boîte. Malgré les commodités qu'offre cette disposition, l'emploi de deux manettes a l'inconvénient de forcer le mécanicien à faire trois mouvements pour renverser la marche en vitesse : ramener au départ le levier du commutateur, faire tourner le levier de l'inverseur, puis ramener le premier levier sur une touche convenable ; on y trouve, il est vrai, un certain avantage, car un renversement trop brusque présente des dangers graves pour les moteurs et donne lieu à une forte secousse, tandis que par l'enclenchement on force le mécanicien à introduire au moment de cette manœuvre toute la résistance de démarrage. Néanmoins, bien des ingénieurs peuvent préférer que le changement de marche et la régulation se fassent à l'aide d'un seul et même levier, comme sur les locomotives à vapeur grâce à l'emploi de la coulisse de Stephenson. C'est là un desideratum toujours facile à satisfaire moyennant une légère complication de construction : il suffit de doubler le commutateur d'une partie symétrique par rapport à la ligne d'arrêt, de façon qu'en tournant le levier de manœuvre soit dans un sens, soit dans l'autre à partir de cette position neutre, on réalise la même série de combinaisons pour la régulation de vitesse ; on ajoute en outre sur le même cylindre les dispositifs d'inversion, de manière à changer le sens de marche quand on passe par la position neutre. C'est ainsi qu'ont été construits autrefois, par exemple, le régulateur Edison, dont la figure 635 (p. 226) donne le développement, le régulateur de la Cie de l'Industrie Électrique (p. 196), etc.

La comparaison des deux systèmes montre que le régulateur à un seul cylindre exige un peu plus de hauteur ; mais la simplicité de manœuvre qui en résulte pourrait, croyons-nous, justifier cette disposition dans bien des cas, contrairement à l'usage actuel.

De toutes façons, il n'est jamais nécessaire de conserver pour la marche arrière toutes les mêmes combinaisons que pour la marche avant : cette marche arrière est, en effet, un fait exceptionnel et il suffit de pouvoir la réaliser à faible vitesse ; une seule position de régulateur est donc suffisante, ainsi qu'on en verra des exemples plus loin.

Suppression de l'inversion de marche sur les tramways. — A ce dernier point de vue, l'emploi d'un levier d'inversion spécial paraît peu justifié sur les tramways ; d'une part, en effet, il est peu prudent de donner au mécanicien le moyen de faire partir sa voiture en arrière sans pouvoir en surveiller la marche, au risque d'aller tamponner d'autres voitures ou des piétons ; d'autre part, la marche arrière n'est nullement nécessaire, comme on l'a vu, pour le freinage. Il serait donc sage et rationnel de donner au mécanicien seulement la possibilité de la marche en avant et de l'arrêt par mise en court-circuit des moteurs, en l'obligeant, s'il

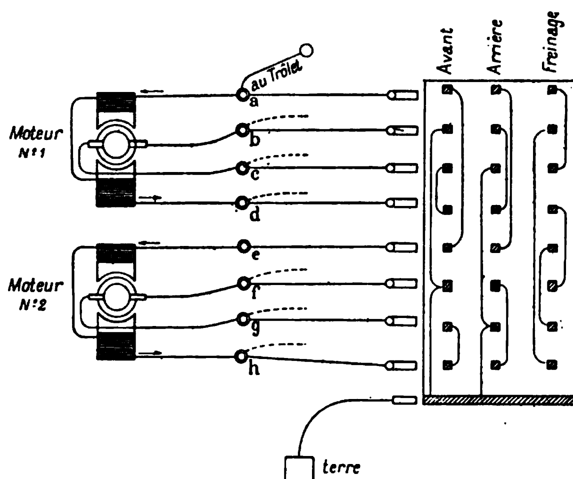


Fig. 605. — Schéma d'un inverseur servant en même temps au freinage.

veut faire reculer sa voiture, à se transporter momentanément sur l'autre plate-forme. Cela conduit à supprimer le levier d'inversion et les enclenchements compliqués qu'il entraîne, et à ajouter au commutateur ordinaire deux ou plusieurs positions de freinage.

C'est la meilleure disposition que nous puissions conseiller.

On peut, du reste, conserver la sécurité offerte par ce système, tout en se réservant la possibilité de pratiquer l'inversion de marche là où on est sûr qu'elle n'aura pas d'inconvénient, en particulier dans les remises où elle peut être avantageuse pour le rangement des voitures : il suffit pour cela d'établir un inverseur qui ne puisse être manœuvré qu'à l'aide d'une clef spéciale confiée non au mécanicien, mais au receveur de la voiture ou au chef de dépôt.

Connexions pour le freinage. — Les touches nécessaires pour produire le freinage électrique par inversion ou mise en court-circuit des moteurs ou par excitation de freins électromagnétiques s'adaptent aujourd'hui sur le régulateur lui-même et il n'est pas besoin de commutateur spécial à cet effet : il suffit d'ajouter quelques touches et quelques frotteurs soit au commutateur, soit à l'inverseur. C'est cette dernière disposition qui est la plus fréquemment adoptée aujourd'hui.

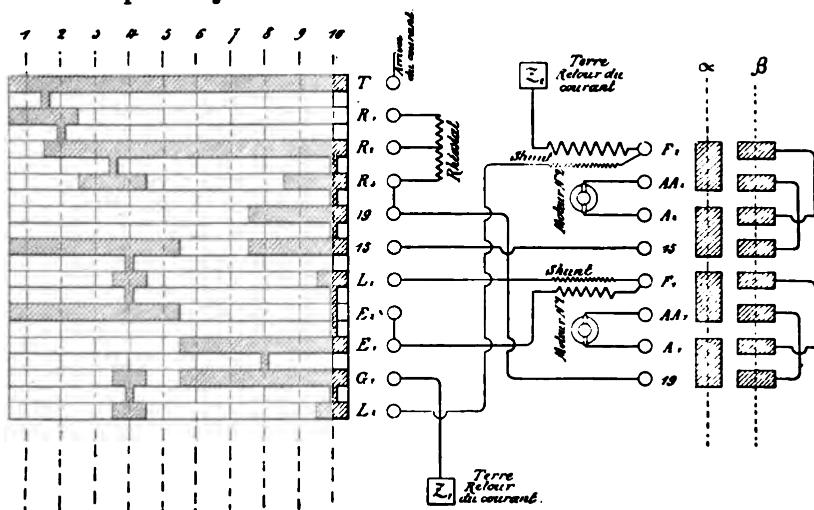


Fig. 606. — Exemple de schéma des combinaisons d'un régulateur à cylindres (régulateur K de la General Electric Co.).

La figure 605 représente, par exemple, un inverseur complété par une troisième rangée de touches pour l'emploi de la méthode de Bonta dans le cas d'un équipement à deux moteurs en parallèle; les combinaisons s'expliquent d'elles-mêmes si l'on se reporte au paragraphe 2 (p. 184). On verra ci-dessous d'autres exemples de freinage par les moteurs (§ 4).

Représentation pratique des combinaisons réalisées par les régulateurs. — On indique ordinairement les divers groupements des appareils correspondant à chaque position de la manette du régulateur à l'aide de schémas où l'on représente en développement les surfaces du commutateur et de l'inverseur, comme on le voit, par exemple, sur la figure 606; chaque position des frotteurs

est marquée par une ligne; les connexions des frotteurs avec les moteurs et les rhéostats sont représentées sur le même diagramme.

Mais ce procédé, très clair pour les ingénieurs, n'est pas accessible en général aux conducteurs ni aux mécaniciens des voitures, auxquels il est cependant désirable de faire comprendre un peu ce qu'ils font en tournant la manette de leur régulateur. En Amérique, où l'on se préoccupe beaucoup de développer l'intelligence et les connaissances professionnelles de ces agents dans l'intérêt du service, on a recours pour eux à des schémas simplifiés qui parlent plus facilement à leurs yeux.

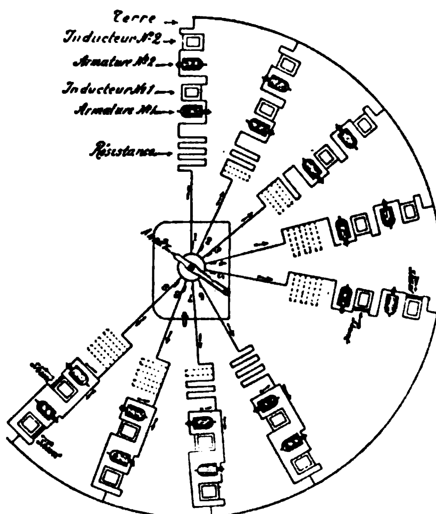


Fig. 607. — Schéma de régulation rapporté au régulateur.

Une des meilleures méthodes à ce point de vue nous paraît être celle de la Milwaukee Railway and Light Co., qui consiste à figurer sur une feuille de papier les diverses combinaisons dans le prolongement même de la position qu'occupe la manette du régulateur sur son couvercle. La figure 607, qui s'explique suffisamment d'elle-même, donne un exemple de ce mode de représentation appliqué à la régulation série-parallèle de la General Electric Co. avec régulateur type K2 à trois résistances.

Organes accessoires de l'équipement d'une voiture. — Nous ne reviendrons pas ici sur la disposition des circuits des voitures, qui a été expliquée avec détails au chapitre VI et que rappelle suffisamment la figure 608; mais nous donnerons quelques indications sur les appareils accessoires qui y figurent : interrupteurs, coupe-circuits, disjoncteurs, parafoudres.

Un *interrupteur* est nécessaire sur chaque plate-forme; on le place généralement au-dessus de la porte ou au plafond, à portée

de la main du mécanicien; quelques maisons préfèrent le placer à

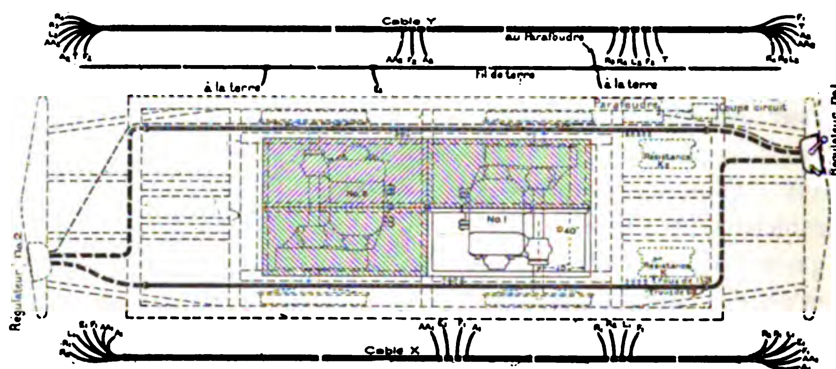


Fig. 608. — Exemple de disposition des câbles conducteurs et accessoires sur une voiture de tramway (matériel de la General Electric Co.).

côté du régulateur. Ces appareils doivent être bien fermés et assurer une bonne rupture brusque pour éviter l'arc à 500 volts. Nous en donnons des exemples assez variés : les figures 609 et 610 représentent le type à simple manette, le plus employé en Amérique; la figure 611, le type Siemens à poignée, construit en France par la Société Alsacienne; un type analogue est employé par la Société d'Oerlikon à côté du régulateur (fig. 612) ; enfin la figure 613 montre le type Clémançon, employé sur les voitures de Paris-Romainville.



Fig. 609. — Interrupteur principal de la General Electric Co.

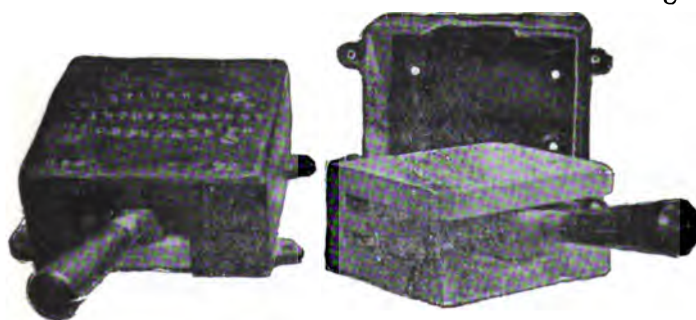


Fig. 610. — Interrupteur principal de la Cie Westinghouse.

L'interrupteur de sûreté de la *Société Alsacienne* consiste en deux tubes de laiton, A et A_1, recourbés de façon à pouvoir passer sous la voiture et fixés contre le garde-boue en tôle à portée de la main du conducteur. Un autre tube de laiton E, recourbé en forme d'U, peut venir coulisse à frottement doux sur les deux premiers. Tous trois sont recouverts d'un tuyau en caoutchouc très épais et protégés en outre par une gaine en cuir verni. Le courant arrive directement de l'archet, à travers le disjoncteur automatique, au tube A et passe par la poignée E au tube A_1 et aux appareils de commande. S'il se produit un accident quelconque et que les appareils ordinaires ne suffisent pas pour interrompre le circuit, le mécanicien n'a qu'à saisir la poignée E et à la tirer brusquement à lui pour couper le courant.

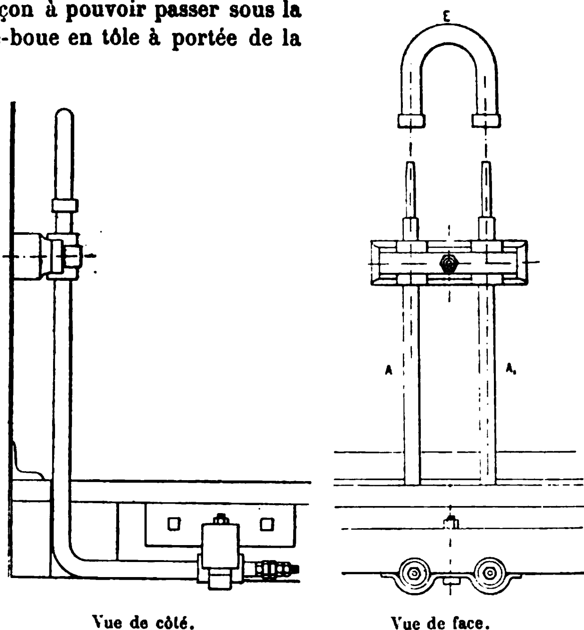


Fig. 611. — Interrupteur de sûreté de la Société Alsacienne, type Siemens.

L'interrupteur d'*Oerlikon* se

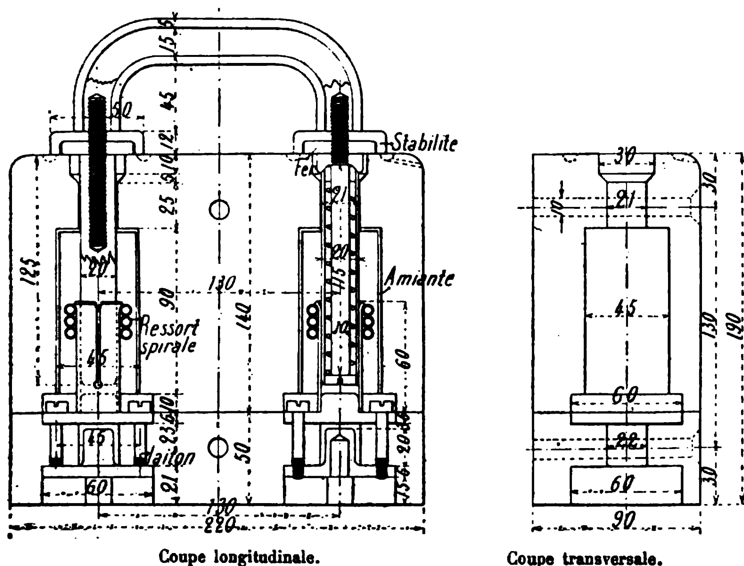


Fig. 612. — Interrupteur de sûreté des Ateliers d'Oerlikon.

manœuvre de même; deux tiges pénètrent dans des douilles à ressort; lorsqu'on tire la poignée qui les relie, on tend d'abord les ressorts des tiges, puis

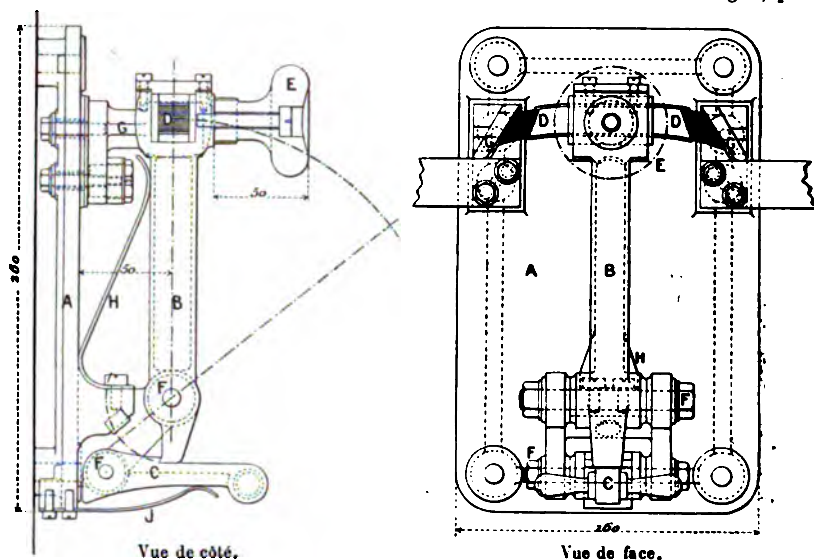


Fig. 613. — Interrupteur de plate-forme des Établissements Clémançon (tramway de Romainville).

celles-ci s'échappent brusquement ; les étincelles de rupture se produisent dans deux chambres garnies d'amiante.

Dans le type *Clémançon*, l'interrupteur comprend un levier principal B, qu'on

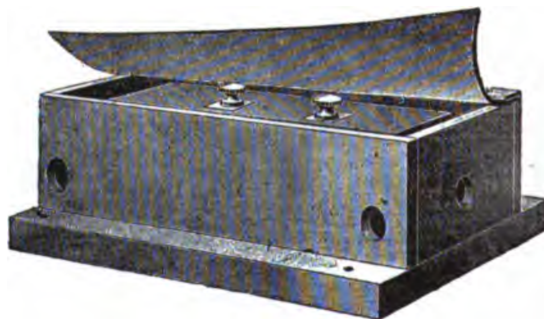


Fig. 614. — Boîte de coupe-circuit fusible de la General Electric Co.

engage à la main, et un levier de déclenchement C; celui-ci retient le premier; lorsqu'on l'abaisse, le levier principal est chassé brusquement par le ressort H.

Le *coupe-circuit* est généralement formé d'une bande d'alliage ou d'un fil de cuivre fusible, de section proportionnée au courant

et serré entre deux bornes ou mâchoires montées sur une tablette de porcelaine ou d'un isolant analogue; le tout est enfermé dans une boîte hermétiquement close (fig. 614). La distance entre les deux bornes et le refroidissement prévu doivent suffire pour empêcher, après fusion, la formation d'un arc sous la tension élevée du réseau. Quelques constructeurs ajoutent même un souffleur magnétique.

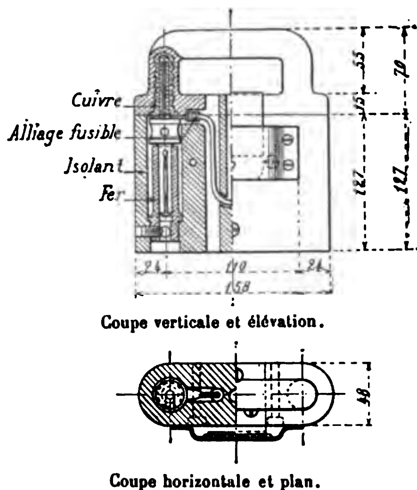


Fig. 615. — Coupe-circuit fusible de la Cie de Fives-Lille.

Le tableau suivant résume, d'après des expériences des compagnies d'assurances de Chicago [1], les distances nécessaires dans l'air sous la tension de 500 volts.

INTENSITÉ du courant continu en ampères.	DISTANCE MAXIMA à laquelle persiste l'arc en mm.	DISTANCE MINIMA prévenant la formation de l'arc en mm.	DISTANCE de sécurité en mm.
10	6,3	6,3	25
20	12,7	19	50
30	30	50	69
40	50	56	82
50	56	63	88
60	76	81	94
70	79	85	101
80	83	90	104
90	89	96	110
100	95	102	113

Une cloison en ardoise ou en porcelaine facilite l'extinction de l'arc.

Les mécaniciens doivent avoir des fils fusibles de rechange ; quelques constructeurs, notamment la Compagnie Card, préfèrent

[1] *Electrical Journal*, Chicago, 15 août 1895.

mettre dans la boîte du coupe-circuit une bobine entière de fil du type convenable [1].

La figure 615 représente, à titre d'exemple, le type de coupe-

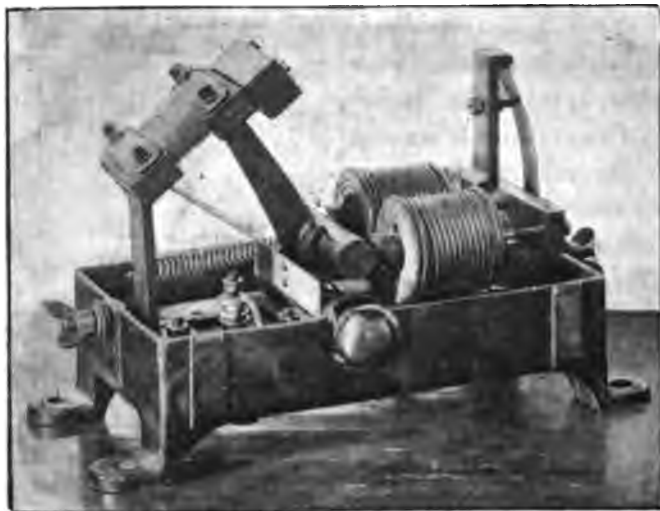


Fig. 616. — Disjoncteur automatique Siemens de la Société Alsacienne. Vue générale.

circuit pour tramways de la *Cie de Fives-Lille ;* le fusible est fixé au couvercle, ce qui permet de le vérifier et le remplacer avec la plus grande facilité.

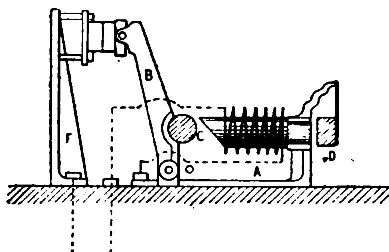


Fig. 617. — Disjoncteur automatique de la Société Alsacienne. — Schéma du fonctionnement.

Les fusibles n'offrent pas une garantie bien grande de précision; un retard de fusion peut amener des avaries aux moteurs et autres appareils; enfin, après chaque fusion, il faut aller remplacer le fil, ce qui prend du temps. Aussi a-t-on cherché à les remplacer par des *disjoncteurs automatiques*, toujours prêts à fonctionner et susceptibles d'un réglage plus précis; les figures 616 à 619 montrent des exemples de ces appareils, qui commencent à entrer dans la pratique.

[1] *Electrical World*, 9 novembre 1895.

Nous décrirons en premier lieu celui de la *Société Alsacienne* (fig. 616 et 617).

L'appareil se compose d'un socle en fonte qui porte, par l'intermédiaire d'une plaque isolante en stabilite, d'un côté un support en bronze A, de l'autre une console en fonte F. Sur la pièce de bronze sont emmanchés les noyaux en fer doux d'un électro-aimant. L'extrémité libre de ces noyaux est taillée en sifflet et une pièce en fer doux C, vissée sur le levier en bronze B, peut se déplacer devant les pôles de l'électro. Ce levier B porte à son extrémité une pièce de cuivre qui vient s'appliquer, lorsque le levier est abaissé, sur des charbons portés par la console en fonte F. Un ressort tend à appuyer le levier sur les charbons et un bouton isolé en ébonite permet d'abaisser ce levier lorsqu'il est soulevé. Une pièce en fer doux D, maintenue par un ressort, peut venir s'appliquer sur les noyaux de l'électro lorsque le courant dépasse dans les bobines une certaine intensité. Enfin, une boîte en tôle garnie intérieurement d'amiante couvre tout l'appareil. Une ouverture est ménagée dans ce couvercle pour laisser passer le bouton de manœuvre.

Les connexions sont faites comme l'indique le schéma : le courant arrivant de l'archet passe dans l'électro et de là dans le levier B, la console F et les moteurs.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant : lorsque le courant dépasse un certain nombre d'ampères (150 pour le cas de deux moteurs), la pièce en fer doux C est attirée par l'électro ; la réluctance du circuit magnétique est aussitôt diminuée d'une façon considérable, le levier B est soulevé brusque ment et le courant est coupé. La Société Alsacienne construit deux modèles de ces appareils, l'un pour un moteur, l'autre pour deux moteurs.

Le disjoncteur automatique type M de la *General Electric Co.* ressemble à son interrupteur ordinaire à manette et peut aussi être manœuvré à la main; il est déclenché automatiquement par un électro-aimant et l'arc est soufflé par un souffleur magnétique. On le règle facilement en tendant plus ou moins un ressort de façon qu'il fonctionne exactement au courant voulu. Il en existe deux modèles, l'un pour 75-150 amp., l'autre pour 150-250 amp. On y joint dans certains cas un enregistreur automatique qui note les ruptures produites et permet ainsi de prendre le mécanicien en faute.

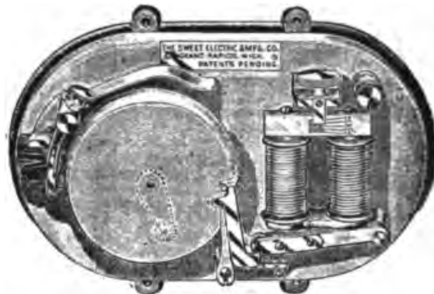


Fig. 618. — Disjoncteur automatique Sweet.

La figure 618 représente une construction toute différente de la *Sweet Electric Manufacturing Co.* Au moment où le courant dépasse la limite fixée, l'électro déclenche un doigt qui retient un tambour; celui-ci est aussitôt entraîné par un ressort et rompt le contact sur le côté opposé. Une petite manette placée extérieurement et qui est figurée en pointillé permet de rétablir les choses en l'état.

On peut, pour faciliter la rupture des arcs dans les disjoncteurs automatiques, placer, comme le montre la figure 619, un fil fusible fin en dérivation

par rapport au disjoncteur; celui-ci s'ouvre sans étincelle et le fil fin fond de suite. Le fusible, fixé au couvercle, se remplace aisément et le disjoncteur automatique peut être mis hors fonction par un crochet, qui l'enclenche du reste de lui-même à chaque rupture.

Il faut avoir soin de placer les coupe-circuits fusibles sous le plancher, de façon qu'ils ne puissent blesser personne s'il se produit une projection de métal fondu, et près d'un angle, de manière qu'on puisse y accéder aisément ; l'ouverture doit en être facile pour le remplacement des plombs.

Enfin, le *parafoudre* doit être placé de même sous la voiture, et à l'abri de l'eau et de la boue projetées par les roues; il est bon de le séparer du plancher par une feuille d'amiante, pour éviter toute cause d'incendie.

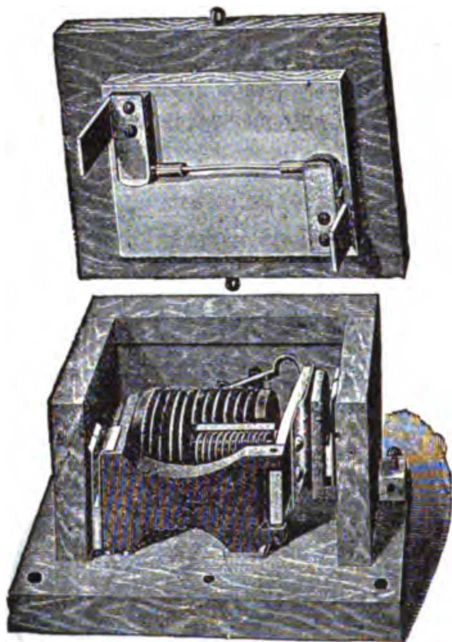


Fig. 619. — Disjoncteur automatique combiné avec un fusible.

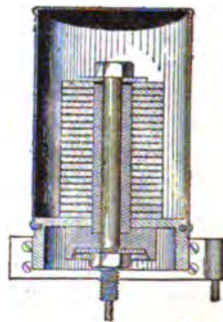
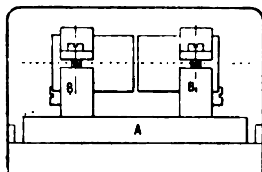


Fig. 620. — Coupe d'un parafoudre à lames.

Nous ne ferons pas ici la théorie des parafoudres. Leurs dispositifs très variés reviennent tous à laisser jaillir la décharge entre deux pôles assez rapprochés et à produire ensuite l'extinction de l'arc permanent qui tend à suivre le chemin ouvert par cette décharge. Par exemple, dans le parafoudre universellement connu du Prof. E. Thomson (General Electric Co.) (fig. 621), on souffle l'arc par un électro-aimant puissant; dans celui de Siemens (Société Alsacienne) (fig. 622), on le laisse jaillir entre deux charbons et l'on

coupe le circuit par un disjoncteur automatique ; dans celui de Wurts (Compagnie Westinghouse) (fig. 623), on refroidit l'arc en le faisant jaillir entre deux pièces de bois de gaïac, dont l'une porte des rainures carbonisées aboutissant à deux électrodes métalliques, etc.

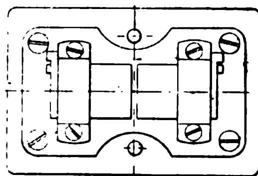


Elévation.

Le parafoudre à lames (fig. 620) est formé de disques en cuivre ou mieux, en zinc, séparés



Fig. 621. — Parafoudre de la General Electric Co.



Plan.

Fig. 622. — Parafoudre de la Société Alsacienne.

par des disques en mica ; la foudre s'écoule sur la surface extérieure et l'arc est trop refroidi pour pouvoir se maintenir aux nombreux points de rupture.

L'appareil de la *Société Alsacienne* (fig. 622) consiste en un support en stabilité A sur lequel sont fixés deux supports en fonte B et B_1. Ces deux supports servent à maintenir deux blocs de charbon qu'on peut rapprocher plus ou moins l'un de l'autre. L'un des blocs est réuni à la terre et l'autre au disjoncteur automatique décrit ci-dessus.

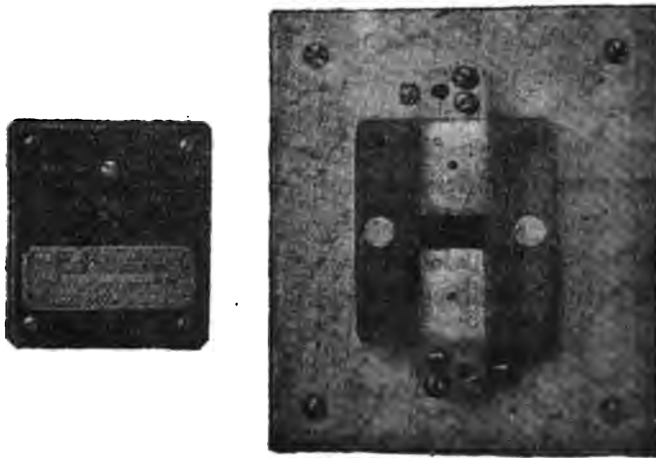


Fig. 623. — Parafoudre Wurts de la Cie Westinghouse.

Lorsque la foudre vient à tomber sur la voiture, un arc se forme entre les deux charbons et le courant s'en va directement à la terre. Le courant fourni par la ligne continue à passer entre les deux charbons ; mais, dès qu'il atteint une certaine intensité (150 ampères dans le cas de deux moteurs), le disjoncteur automatique fonctionne et coupe le circuit.

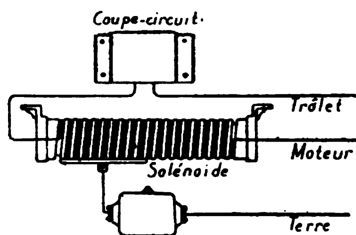


Fig. 624. — Montage d'un parafoudre Westinghouse.

Tout parafoudre doit être complété par une self-induction placée sur le trajet du moteur de façon à le fermer pratiquement à la décharge oscillante en vertu de sa réactance considérable. Cette self-induction est formée en général de quelques spires de gros fil ou de câble enroulées sur un noyau en bois de 8 à 10 cm. de diamètre ; la figure 624 indique sur un exemple ce mode de construction et le montage des appareils.

§ 4. — Exemples des divers systèmes de régulation

Pour compléter les indications générales qui précèdent et leur donner une forme plus concrète, nous décrirons rapidement les principales applications des divers modes de réglage réalisées par les constructeurs américains ou européens[1], en indiquant schématiquement les circuits de voiture correspondants ; quelques-uns de ces dispositifs, aujourd'hui remplacés par d'autres chez les mêmes constructeurs, présentent cependant un intérêt historique qui nous a paru en justifier la description.

RÉGULATION PAR RHÉOSTAT

Dispositif Thomson-Houston. — Pendant plusieurs années, la Compagnie Thomson-Houston a employé pour ses voitures électriques l'équipement représenté par la figure 625. Les deux moteurs étaient alimentés en parallèle et leur

[1] Il va sans dire que, lorsqu'il s'agit de dispositifs employés par tout le monde, comme la méthode du rhéostat ou la méthode série-parallèle, nous citons seulement quelques-uns des constructeurs, sans vouloir donner pour autant leurs dispositifs comme meilleurs que ceux des autres.

courant était réglé par un rhéostat unique du type décrit plus haut (p. 187), dont la manette pouvait être manœuvrée par des cordes de l'une ou l'autre plate-forme à l'aide des arbres à manivelle K. Le courant arrivant du trôlet N passait par les deux interrupteurs de plate-forme C,C, le coupe-circuit G et le parafoudre O (relié d'autre part au truck); de là, il se rendait à la manette du rhéostat M, traversait celui-ci jusqu'en y, puis parcourait les inducteurs (en parallèle), l'inverseur, les armatures (en parallèle) et gagnait enfin le truck et la voie.

Quand on tournait la manette du rhéostat vers y, la résistance traversée décroissait jusqu'à tomber à zéro lorsque la manette arrivait en y. Si on la

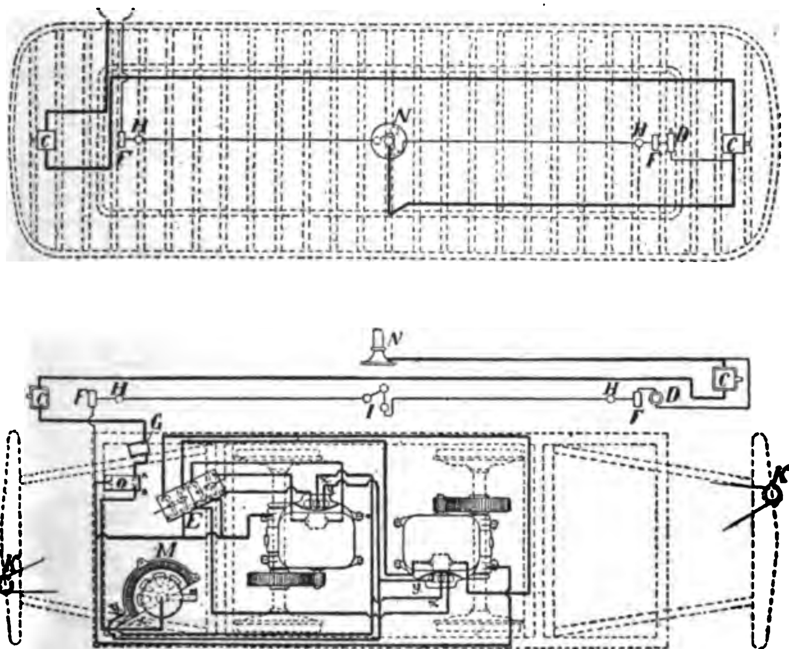


Fig. 625. — Ancienne régulation par rhéostat de la Cie Thomson-Houston.

poussait au contraire jusqu'en x, le courant se rendait directement par le fil qui part de ce point en des points intermédiaires des circuits inducteurs (méthode de la boucle).

L'inverseur était commandé de chaque plate-forme par un levier spécial, et un enclenchement mécanique ne permettait de le manœuvrer que lorsque la résistance maxima était en circuit.

Dispositif de la General Electric Co. — La General Electric Co. a abandonné ce dispositif et emploie aujourd'hui, pour la régulation par rhéostat des voitures à un seul moteur, un régulateur type R à commutateur cylindrique (fig. 626), avec deux boîtes de résistances divisées en tout en 5 parties, qui présente les mêmes dispositions mécaniques que ses régulateurs série-parallèle.

Dispositifs Thury (1893). — Jusqu'à ces derniers temps, la Compagnie de l'Industrie Électrique de Genève a conservé le réglage par rhéostat, mais ses appareils ont subi plusieurs modifications, dont l'une des plus intéressantes a été l'adjonction du freinage électrique. Les figures 627 et 628 représentent le dispositif qui fonctionne sur les voitures des tramways de Genève. Sur chaque plate-forme est placé un régulateur qui permet d'effectuer, par la manœuvre d'une seule manivelle, la régulation, le freinage et le changement de marche. La figure 627 donne l'ensemble des connexions entre la ligne, le moteur, les deux boîtes de manœuvre et les caisses de résistances, qui sont ici au nombre de deux, et la figure 628 montre l'apparence extérieure du régulateur, dont nous avons indiqué plus haut le mode de construction (fig. 598).

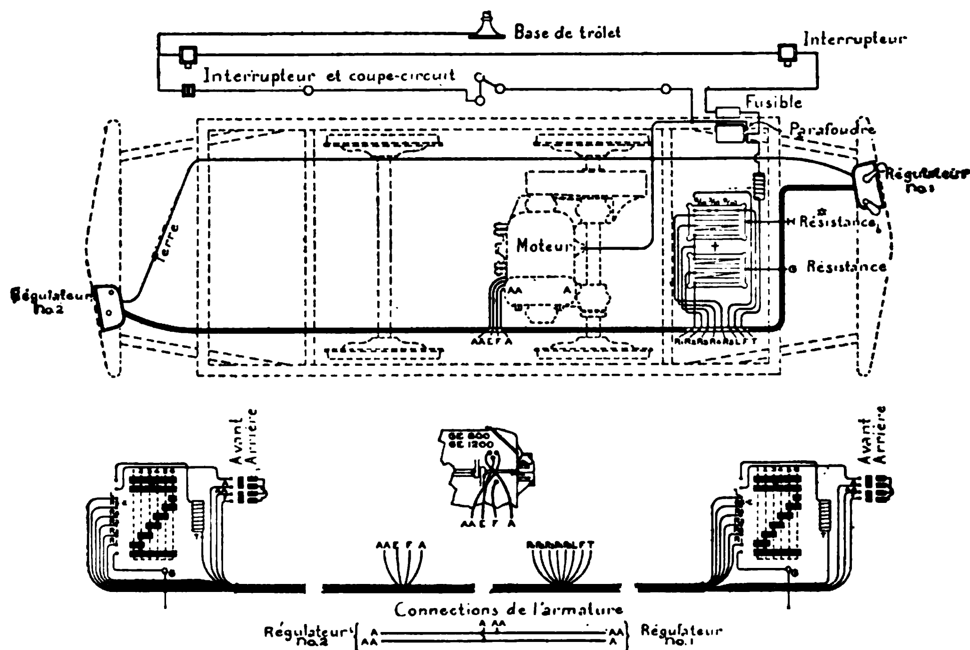


Fig. 626. — Régulation par rhéostat pour un moteur de la General Electric Co.

Le conducteur a sous sa main gauche le levier, dont la position verticale correspond à l'arrêt ; en le poussant en avant, il met la voiture en marche en avant ; en le tirant à lui, il la fait marcher en arrière ; une roue ondulée dans laquelle s'engage un ressort l'avertit du passage des frotteurs sur les divers plots et maintient le levier en position. Celui-ci ne peut être retiré de la boîte ou remis en place qu'à la position d'arrêt. Le levier se termine par un secteur denté engrenant avec une crémaillère qui commande la manette du commutateur ; cette dernière porte deux plaques de cuivre isolées l'une de l'autre et mettant chacune en communication l'un des deux contacts circulaires A et B avec les touches extérieures numérotées de 1 à 10.

Le schéma des connexions (fig. 627) permet de suivre facilement la marche

du courant dans les différentes positions de la manette. A la position d'arrêt, toutes les communications sont coupées. En poussant légèrement le levier en avant, la manette vient sur les touches 10 et 9; à ce moment, le courant arrivant de la ligne se rend dans l'induit, puis dans les résistances qu'il traverse toutes; de là il passe au plot 9 et par la manette au contact A et aux électros du moteur, revient au contact B, à la manette et à la touche 10, au second cadre de résistances qu'il traverse en entier et aboutit enfin à la terre. Dans la position suivante, qui est celle des plots 8 et 7, la résistance traversée est un peu moins grande, et ainsi de suite jusqu'aux plots 2 et 1, où il

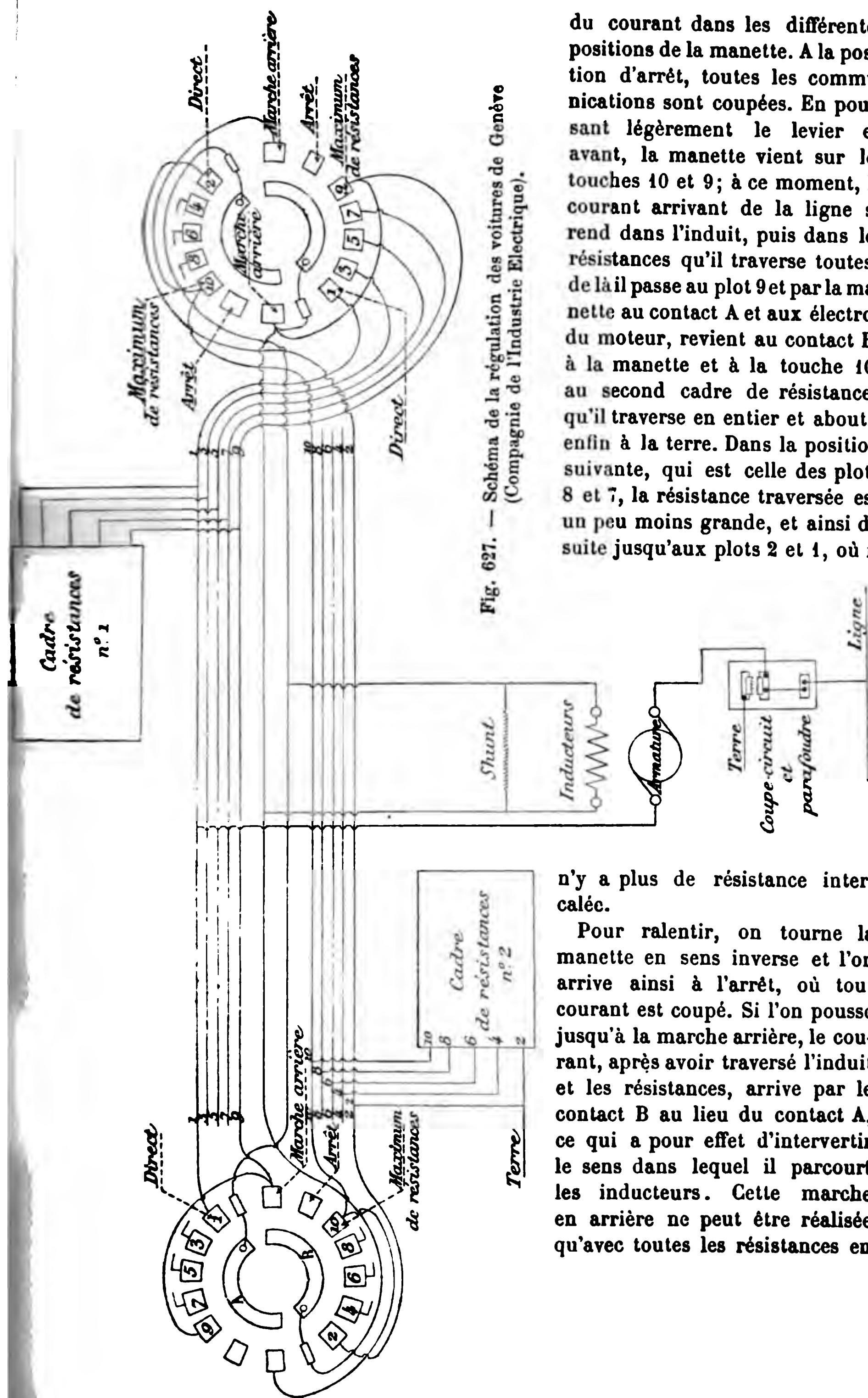


Fig. 627. — Schéma de la régulation des voitures de Genève (Compagnie de l'Industrie Électrique).

n'y a plus de résistance intercalée.

Pour ralentir, on tourne la manette en sens inverse et l'on arrive ainsi à l'arrêt, où tout courant est coupé. Si l'on pousse jusqu'à la marche arrière, le courant, après avoir traversé l'induit et les résistances, arrive par le contact B au lieu du contact A, ce qui a pour effet d'intervertir le sens dans lequel il parcourt les inducteurs. Cette marche en arrière ne peut être réalisée qu'avec toutes les résistances en

circuit, ce qui limite le courant à une faible valeur et permet de recourir sans danger à ce régime comme mode de freinage au lieu de fermer le moteur sur lui-même.

Grâce à cette circonstance, la manœuvre du freinage se fait instantanément en ramenant directement le levier en arrière jusqu'à fond de course. L'arc



Fig. 628. — Régulateur de la Compagnie de l'Industrie Électrique.

qui prend naissance au moment de la rupture du circuit à l'arrêt est éteint par un souffleur magnétique.

Dispositifs des Ateliers d'Oerlikon (1892 et 1894). — La Société d'Oerlikon a appliqué un système analogue de régulation par rhéostat aux voitures qu'elle a équipées pour le tramway de Marseille, d'après le procédé de M. *Fischer-Hinnen* signalé plus haut (p. 149).

La figure 629 donne le schéma de la distribution, et la figure 630 la vue extérieure d'une boîte de manœuvre. Celle-ci comporte encore, comme dans le cas

précédent, un levier mobile autour d'un axe horizontal; mais ce levier commande ici par une roue d'angle l'arbre vertical d'un commutateur cylindrique (système imaginé par M. Piacani). Il y a deux boites de manœuvre en parallèle, une sur chaque plate-forme. Le changement de marche s'opère en renversant le levier en arrière.

La voiture porte deux moteurs excités en série, dont les induits sont groupés en parallèle et les inducteurs réunis de même, disposition vicieuse comme l'avons dit plus haut.

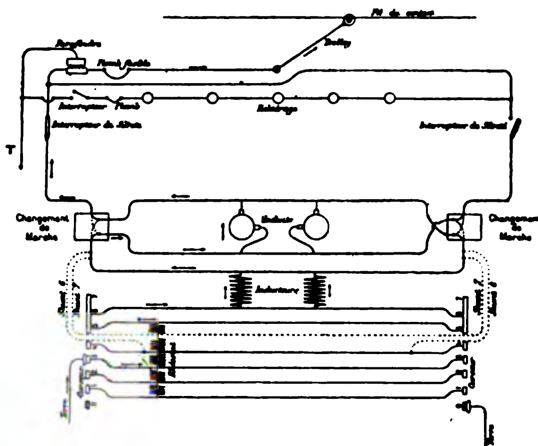


Fig. 629. — Schéma de la régulation des voitures de Marseille (Ateliers d'Oerlikon).

La caisse de résistances, construite d'une façon analogue aux rhéostats américains, est divisée en cinq parties. En manœuvrant le levier en avant à partir de l'arrêt, on ferme d'abord le circuit du moteur sur toutes les résistances en série, puis on retranche successivement celles-ci une à une jusqu'à ce que le courant traverse directement les moteurs. Pour augmenter au besoin la vitesse en palier, on peut alors shunter les inducteurs par l'une des résistances, suivant le circuit indiqué en pointillé; ce shuntage est effectué par le levier lorsqu'on le pousse à sa position extrême.



Fig. 630. — Régulateur des Ateliers d'Oerlikon.

L'inversion de courant par renversement du levier peut être employée pour le freinage en cas de danger extrême, mais on en a vu plus haut les inconvénients.

Plus récemment, sur les tramways de Zurich, la même maison a adopté pour des voitures à un seul moteur un réglage par rhéostat plus perfectionné dont

la figure 631 donne le schéma détaillé. Il est facile de suivre sur cette figure la marche du courant. Les combinaisons réalisées sont analogues à celles de Marseille, à savoir : suppression successive des résistances, puis intercalation

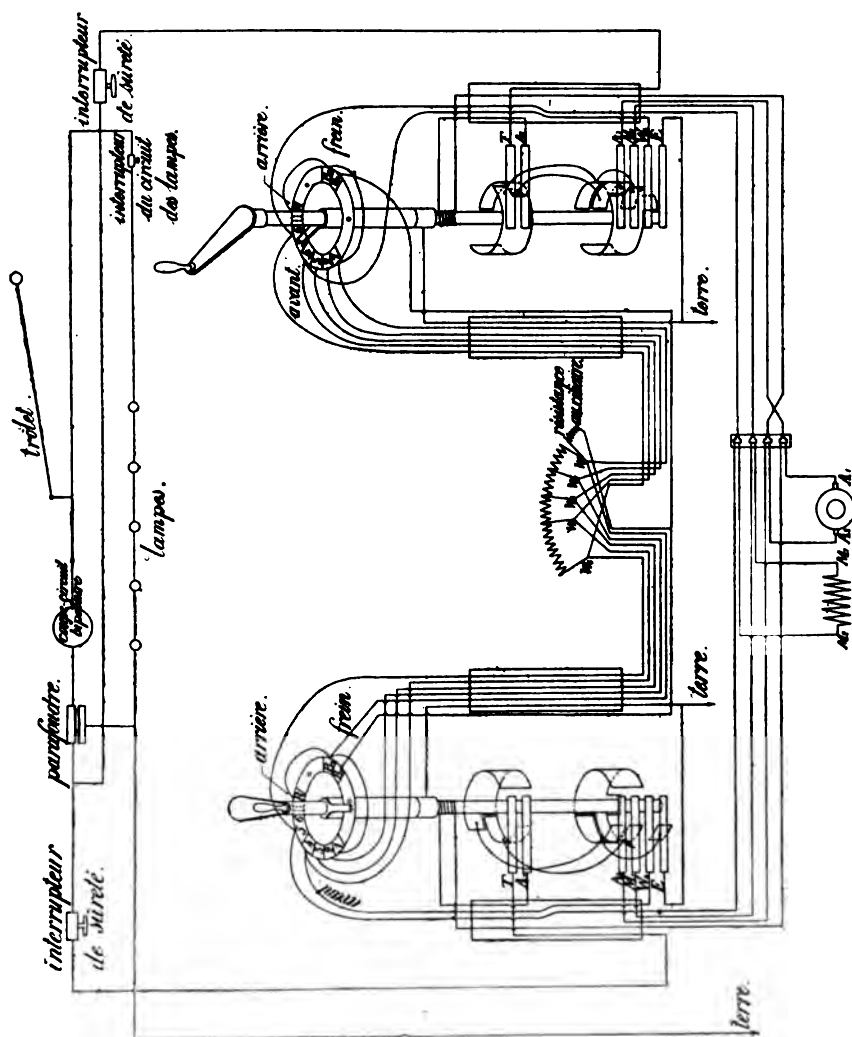


Fig. 631. — Schéma de la régulation des voitures de Zurich (Ateliers d'Oerlikon).

de l'une d'elles comme shunt par rapport à l'enroulement inducteur. Les différences principales résident dans la commande du commutateur par manivelle et dans le procédé de freinage, qui consiste ici à fermer le moteur en court-circuit sur les résistances ; on réalise cette combinaison en amenant la manette de la position d'arrêt (qui est celle figurée pour le régulateur de gauche) sur l'une des touches B_1 ou B_2 suivant qu'on veut un freinage plus ou moins énergique.

Dispositifs de Siemens et Halske et de la Société Alsacienne. — Il y a fort longtemps que la maison Siemens et Halske emploie le mode de régulation par rhéostat, qu'elle a appliqué, en particulier à Budapest, Mulhouse, Bâle, etc., à ses voitures à un seul moteur, sous une forme peu différente de celles décrites ci-dessus; les résistances sont constituées par un rhéostat à boudins placé dans une caisse sous la voiture. La figure 632 représente une disposition plus moderne, avec régulateur à leviers du type décrit plus loin (p. 248). Elle s'explique d'elle-même, car sur chaque direction de la manette sont indiqués les nos des contacts formés dans cette position.

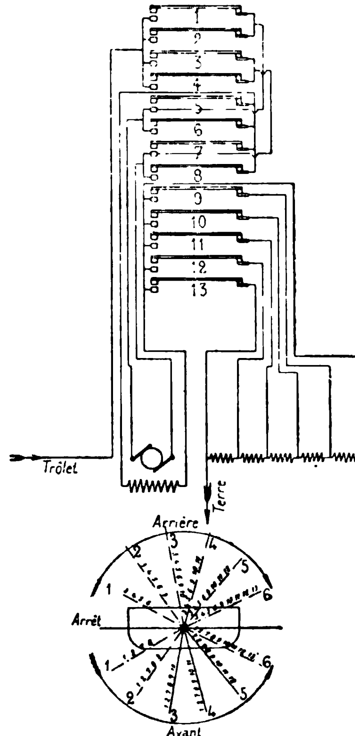


Fig. 632. — Schéma de la régulation par rhéostat de la Société Alsacienne avec régulateur à leviers et à cames.

RÉGULATION SPRAGUE

Les dispositifs dus à M. *Sprague* consistent, comme on l'a vu plus haut, dans la commutation des bobines de champ. Ils ont été adaptés successivement à des voitures munies de l'ancien matériel Sprague (moteurs bipolaires à double réduction), puis au matériel à simple réduction de la General Edison Co. Ils sont conservés avec quelques changements dans le matériel construit actuellement par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft de Berlin (concessionnaire des brevets Sprague) et sa correspondante française, la Compagnie de Fives-Lille, par la Société Schuckert, etc., mais ils sont complètement abandonnés en Amérique.

Le nombre des enroulements à commuter pour chaque moteur a été, après divers tâtonnements, fixé définitivement à trois. Autrefois, pour les moteurs Sprague, chacun de ces trois enroulements comprenait deux bobines, une sur chaque branche d'électro, comme le montre la figure 634. Ils doivent fournir les cinq combinaisons successives représentées par la figure 555 (p. 138). Il est, en outre, toujours nécessaire d'employer une résistance de démarrage. D'autre part, pour éviter les étincelles de rupture lorsque le courant est fort, il est opportun de fermer d'abord la bobine *c* sur

elle-même, afin d'éteindre le courant avant de la mettre hors circuit. En ajoutant ces dispositions intermédiaires, on a été ainsi

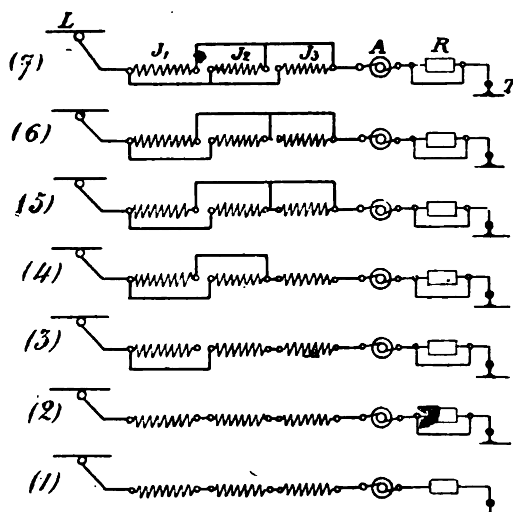


Fig. 633. — Schéma des combinaisons réalisées par la méthode Sprague.

conduit à adopter au minimum sept combinaisons successives représentées schématiquement par le croquis de la figure 633, qui s'applique au cas d'un seul moteur.

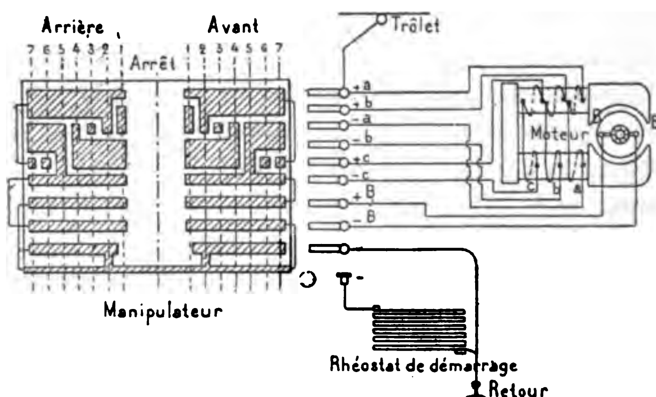


Fig. 634. — Schéma du régulateur Sprague (modèle de Richmond).

Le diagramme schématique (fig. 634) montre comment, dans l'appareil primitif, ces combinaisons étaient réalisées à l'aide de dix frotteurs appuyés contre les bagues métalliques d'un commutateur

cylindrique dont la figure donne le développement. Les frotteurs sont reliés les uns à l'arrivée ou à la sortie du courant, les autres aux balais de l'armature +B et —B ou aux bornes des enroulements inducteurs. Chacun des trois enroulements J_1, J_2, J_3 de la figure 633 aboutit à deux extrémités marquées *a* et — *a*, *b* et — *b*, *c* et — *c* (fig. 634) ; celles-ci sont connectées avec les frotteurs de même nom.

Le commutateur, à 15 touches, comprend deux parties symétriques différant entre elles seulement par le sens dans lequel elles envoient le courant dans l'armature ; l'une des moitiés réalise les 7 combinaisons pour la marche en avant, l'autre celles pour la marche en arrière. Il est aisé de suivre le parcours du courant pour chacune des 7 positions :

1re *position :* le courant arrivant de la ligne traverse successivement en série les 3 galettes inductrices en revenant après chacune au commutateur, parcourt l'armature, puis un rhéostat de démarrage et arrive à la masse du truck communiquant avec la terre. Les positions suivantes produisent des modifications successives de ce parcours.

2e *position :* le rhéostat est mis en court-circuit.

3e *position :* la galette J_1 (*a—a*) est mise hors circuit.

Entre les positions 2 et 3, on ajoute souvent une position intermédiaire pour mettre en court-circuit la bobine J_1 ; mais cette précaution est moins nécessaire ici que pour la bobine J_3 ci-dessous.

4e *position :* les galettes J_1 (*a—a*) et J_2 (*b—b*) sont mises en parallèle.

5e *position :* la galette J_3 (*c—c*) est mise en court-circuit.

6e *position :* maintient la même combinaison que pour la cinquième, avec cette différence que la borne de gauche de la bobine J_3 est détachée.

7e *position :* cette dernière galette est à son tour mise en parallèle avec les deux autres.

Les positions 1 et 5 sont seulement des positions de passage sur lesquelles on ne doit pas séjourner.

Nous avons pris pour simplifier le cas d'un moteur unique ; c'est là, du reste, le seul cas où ce mode de régulation soit aujourd'hui recommandable. Mais, en fait, il a été appliqué en Amérique surtout

à des voitures à deux moteurs par la Compagnie Edison jusqu'à sa fusion avec la Compagnie Thomson-Houston.

On a placé d'abord les deux moteurs en parallèle, avec bobines égalisatrices sur les inducteurs, puis on les a mis en série, pour revenir, en 1892, au couplage en parallèle. Enfin, les régulateurs ont été simplifiés par la suppression totale ou partielle des positions de marche en arrière, qui ne servent à peu près à rien.

Dernier dispositif de l'ancienne Cie Edison-Sprague. — Ce dernier dispositif, complété par l'adjonction d'un rhéostat réglable, dû à M. *Parshall*, est figuré par

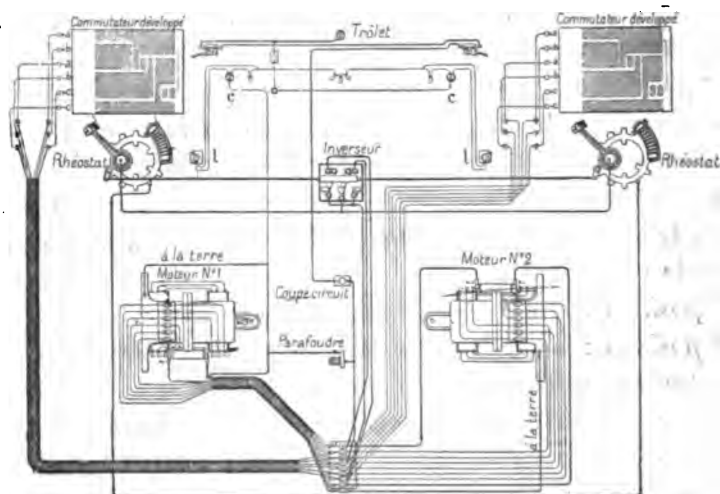


Fig. 635. — Régulation de l'ancienne Compagnie Edison-Sprague.

le schéma de la figure 635. Le commutateur, l'inverseur et le rhéostat étaient redevenus trois organes distincts, commandés par deux arbres réunis dans une même boîte de manœuvre représentée par la figure 585 (p. 188).

Le premier arbre A portait à sa partie supérieure le commutateur à bagues C, sur lequel frottaient 6 balais de contact, et à sa partie inférieure la manette M, terminée par un frotteur F qui se déplaçait sur les touches d'un rhéostat à lames de fer TT' déjà décrit. Ce rhéostat était placé sous le plancher de la plate-forme et protégé par une feuille d'amiante.

Le second arbre B portait à sa partie inférieure un petit levier L, qui commandait par l'intermédiaire d'une longue tige l'inverseur placé à égale distance des deux plates-formes; le premier levier enclenchait le second en E de manière qu'on ne pût manœuvrer l'inverseur qu'après avoir ramené la manette de réglage à la position d'arrêt supprimant tout courant.

Dispositifs de la Société de Fives-Lille et de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Ces deux sociétés combinent la méthode Sprague avec le frei-

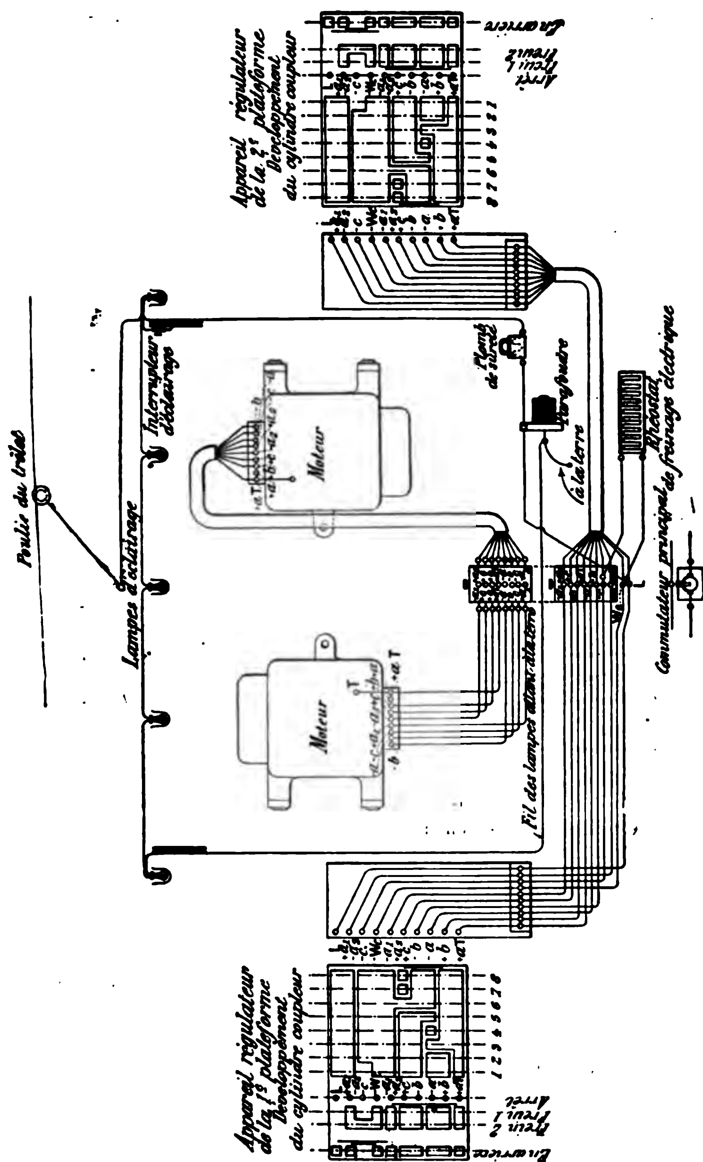


Fig. 636. — Régulation Sprague de la Cie de Fives-Lille et de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. Détails des connexions d'une voiture à deux moteurs.

nage électrique par les moteurs ; elles l'appliquent aux voitures à un et à deux moteurs. La figure 636 représente la disposition des circuits dans ce dernier cas et la figure 637 indique, pour simplifier, les combinaisons réalisées avec un

seul moteur. On connaît, d'après ce qui précède, les combinaisons de marche normale; quant au freinage, il s'obtient par deux combinaisons graduées : le moteur avec ses trois bobines en série est d'abord fermé en court-circuit sur le rhéostat de démarrage, puis celui-ci est mis lui-même en court-circuit; la marche en arrière ne se fait qu'à la vitesse minima.

Le rhéostat est formé simplement de fils de nickeline enroulés sur des planchettes en bois recouvertes d'une forte épaisseur d'amiante; il n'est pas destiné à un fonctionnement prolongé.

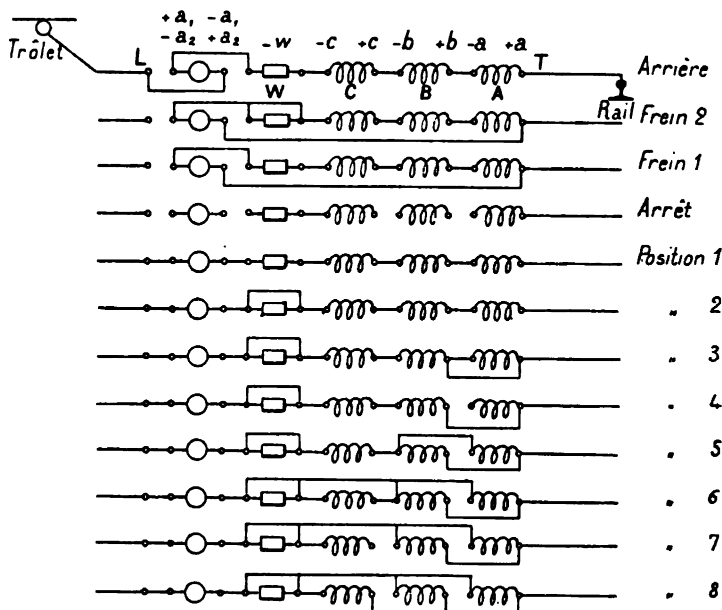


Fig. 637. — Régulation de la Cie de Fives-Lille et de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Schéma des combinaisons réalisées.

Dispositif de la Société Schuckert, de Nuremberg. — La figure 638 représente l'ensemble des circuits et de la régulation d'une voiture à équipement Schuckert, du type en service à Zwickau et à Toulon. C'est une régulation Sprague adaptée à deux moteurs à 4 pôles, à simple réduction, de 15 chev. chacun. Les moteurs sont groupés invariablement en parallèle, armatures d'une part, inducteurs de l'autre. La marche en arrière est réduite à une seule touche; à part cela, les régulateurs ne diffèrent de celui de la figure 635 que par l'ordre dans lequel se présentent les frotteurs et par de petits détails de construction des bagues. Le numérotage des positions a été ramené à 5 en supprimant les numéros d'une touche intermédiaire et de la position de démarrage, qui est indiquée par R.

Dans la position 4, les trois bobines inductrices et la résistance sont en série. Dans la position 1, le rhéostat est mis en court-circuit. Le cran suivant met en court-circuit la bobine (*c*—*c*) de chaque moteur. Dans la position 2, cette

bobine est hors circuit, les deux autres restant en série. Dans la position 3, elle vient en parallèle avec la bobine (b—b). La position suivante, de passage, met la galette (a—a) en court-circuit et la position 4 la met hors circuit. Enfin, au cran 5, les trois galettes se retrouvent en parallèle.

La marche arrière (position A) inverse le sens du courant aux bornes des induits P_1 et P_2, et le fait passer à travers les trois bobines et la résistance de

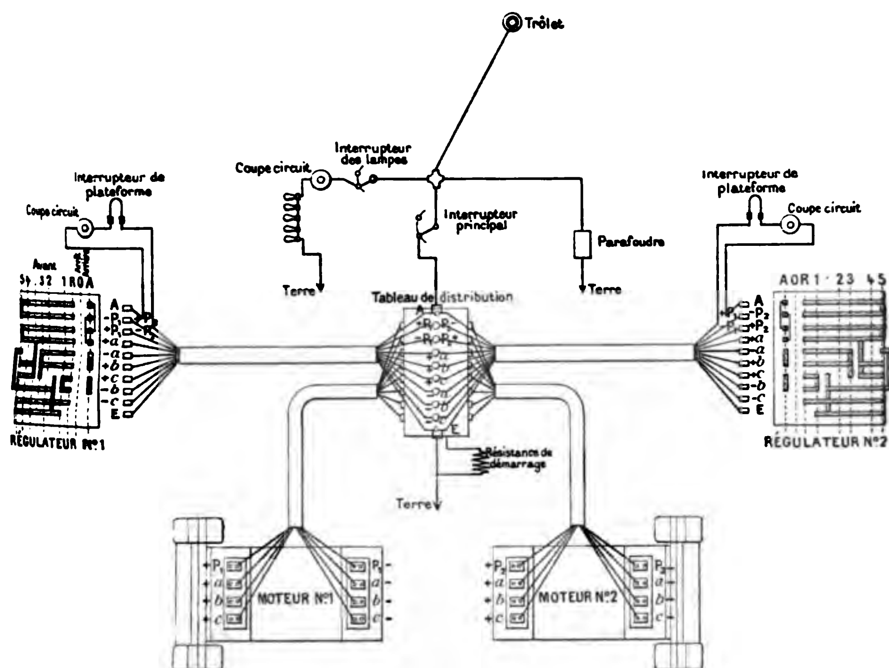


Fig. 638. — Schéma de la régulation des voitures de Zwickau (matériel Schuckert).

démarrage. Cette marche arrière peut donc servir au besoin à produire sans danger le freinage.

Remarque. — Nous ne parlons de la méthode de commutation des galettes que pour les inducteurs en série; on a proposé, il est vrai, de l'adapter à des moteurs en dérivation [1], mais la complication des connexions et les fréquentes ruptures de circuit qu'elle entraînerait seraient ici injustifiées et dangereuses pour l'isolant. La seule façon rationnelle de modifier le champ, c'est le rhéostat d'excitation.

Il est intéressant, du reste, de remarquer que, pour grouper 3 galettes en parallèle à 500 volts, il faudrait un fil d'une ténuité extrême; en comptant, par exemple, une densité de 1,5 à 2 ampères de courant excitateur par millimètre carré pour un moteur de 25 chevaux, il ne faudrait pas moins de 15 à 20 km.

[1] Baxter. *Electrical World*, décembre 1896.

de fil par galette; ce fil, qui aurait 1,2 à 1,8 mm² dans le cas d'un simple enroulement, n'aurait plus que 0,5 à 0,7 mm² dans le cas de trois galettes.

RÉGULATION PAR SHUNT

Dispositif de la Société Schuckert. — La figure 639 représente le schéma du dispositif appliqué par la Société Schuckert aux voitures du tramway de Hambourg-Altona.

Ces voitures sont actionnées par un seul moteur à 4 pôles de 20 chev. à

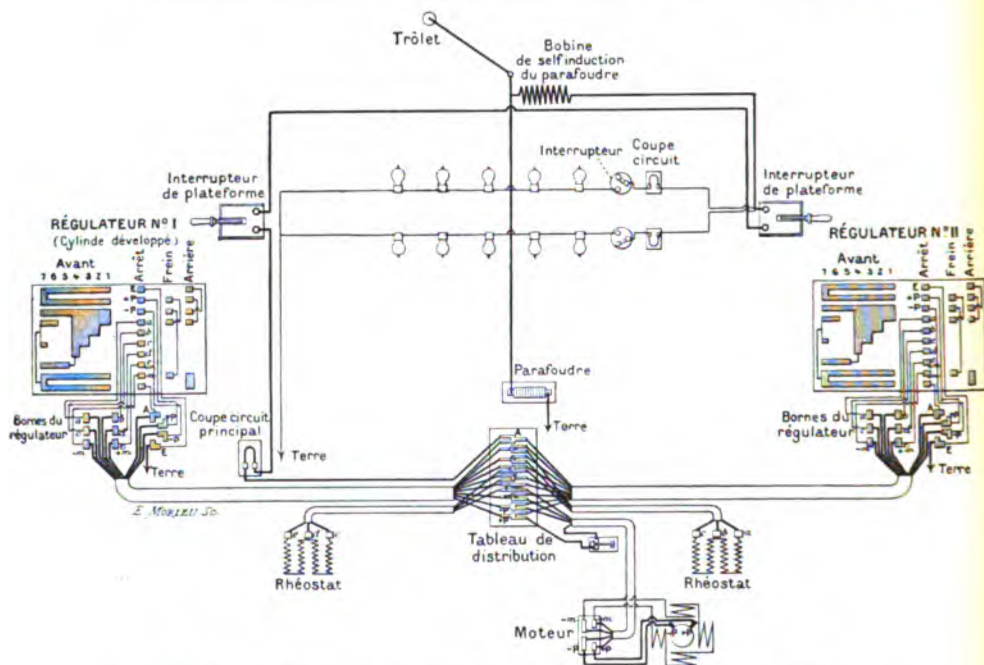


Fig. 639. — Schéma de la régulation des voitures de Hambourg-Altona (matériel Schuckert).

circuits inducteurs invariables. Deux rhéostats, comprenant chacun deux résistances en série et ayant pour bornes *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, peuvent être intercalés en série ou en dérivation avec ces inducteurs, comme nous allons l'expliquer.

Les régulateurs, du type cylindrique à bagues, ont 10 frotteurs reliés aux balais, aux bornes des inducteurs et aux bornes des 4 résistances ; ils comportent 7 positions pour la marche en avant, une pour le freinage et une autre pour la marche en arrière. Il est facile de suivre sur la figure 639 la marche du courant pour chacune de ces combinaisons, que nous résumons par le schéma de la figure 640.

Au moment du démarrage, toutes les résistances $r_1 + r_2 + r_3 + r_4$ sont en

série. Puis, on les court-circuite successivement jusqu'à ce que le courant passe directement de l'induit à l'inducteur (position 5). Dans la position 6, on shunte l'inducteur par les résistances $r_1 + r_2 + r_3 + r_4$, et dans la position 7, par les résistances $r_3 + r_4$ seulement. Ces trois positions 5, 6 et 7 sont les seules économiques; le constructeur les numérote I, II, III et ne considère les précédentes que comme des combinaisons de passage.

Le freinage s'obtient en rompant les connexions avec la ligne et mettant le moteur en court-circuit sur toutes les résistances. Celles-ci restent dans le circuit pour la marche en arrière, qu'on obtient par inversion du courant dans l'induit.

Le circuit d'éclairage est en double par raison de sécurité.

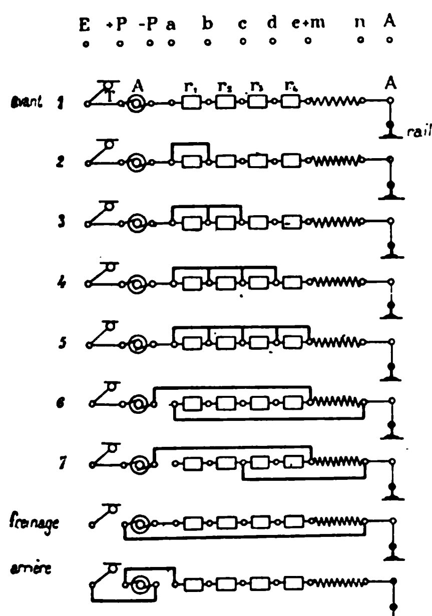


Fig. 640. — Combinaisons réalisées par le régulateur de la figure précédente.



Fig. 641. — Régulateur Kummer. Vue extérieure.

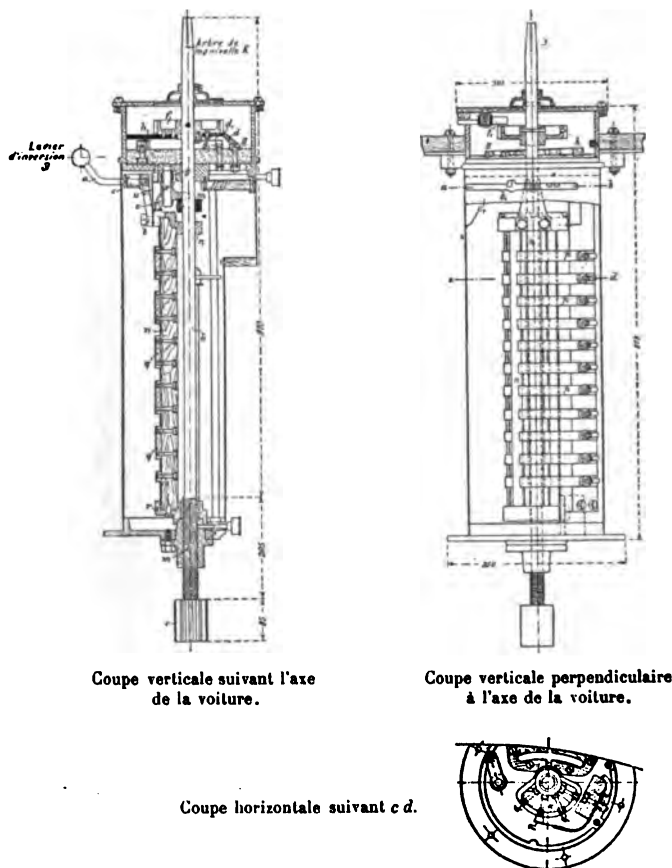
Ces dispositifs sont bien étudiés et constituent un excellent exemple de régulation mixte dans le cas d'un seul moteur.

Dispositif de la Société Kummer. — M. *E. Fischinger*[1] combine, comme M. Parshall, la régulation par le champ avec l'emploi d'un rhéostat réglable et d'un inverseur séparé. Mais il règle le champ par shuntage, son rhéostat est un rhéostat liquide, et l'inverseur, du type cylindrique, permet en même temps le freinage par les moteurs et les changements de couplage série-parallèle ; enfin

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 2 avril 1896, p. 206.

la manœuvre du régulateur et celle des freins mécaniques de la voiture se font à l'aide d'une même manivelle surmontant la boîte de manœuvre.

Celle-ci, que nous décrirons d'abord, est représentée extérieurement par la figure 641 et en coupes par la figure 642. L'arbre vertical porte à sa partie supérieure, sous le couvercle, une roue à cliquet *f* munie d'un frotteur *d*, qui se déplace sur des plots de contact *g*,*h*, reliés aux résistances du shunt destiné



Coupe verticale suivant l'axe de la voiture.

Coupe verticale perpendiculaire à l'axe de la voiture.

Coupe horizontale suivant *c d*.

Fig. 642. — Régulateur Kummer. — Coupes.

à dériver une partie du courant excitateur. A sa partie inférieure, il est muni d'une roue dentée engrenant avec un secteur qui manœuvre les freins à sabots. La disposition de ces freins et leur commande par l'arbre du régulateur sont indiquées sur la figure 643. Il y a pour chaque essieu une paire de sabots portés par une traverse *b*, que la rotation des secteurs dentés *d* approche ou éloigne; les deux secteurs sont solidarisés par des chaînes. Pour serrer les freins à partir de la position d'arrêt de la manivelle *k*, il faut faire faire à celle-ci une

révolution complète; comme l'arbre de manivelle est muni à sa partie inférieure d'un pas de vis s'engageant dans un écrou filcté fixé sous la boite, cet arbre s'élève et le frotteur d quitte les plots, de sorte que le courant se trouve forcément rompu avant que le frein ne soit appliqué, même si le mécanicien a oublié de le couper par l'inverseur.

Ce dernier organe est constitué par une portion de cylindre n (fig. 642) montée autour de l'arbre de manivelle k et munie de plots en cuivre q, séparés par des plots isolants et sur lesquels appuient les extrémités de frotteurs p. Cet inverseur rotatif est commandé par un levier ast, dont la manette as sort de la boite par une fente horizontale ménagée dans celle-ci. Cette tige as se

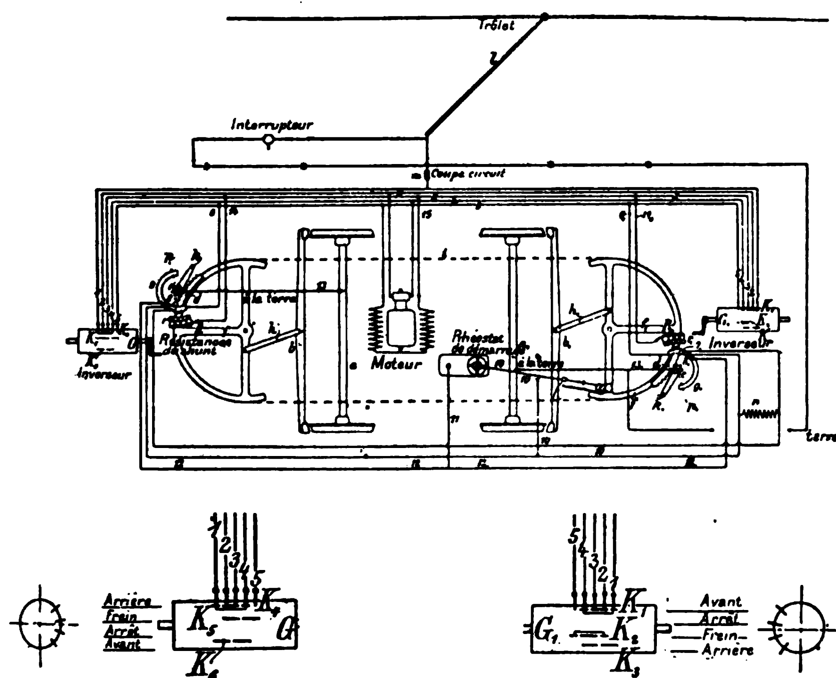


Fig. 643. — Schéma de la régulation mixte Kummer et de l'équipement d'une voiture à un moteur.

dévisse en s et ne peut être retirée par le mécanicien que lorsque l'inverseur est à l'arrêt, par suite quand tous les circuits sont coupés.

Le rhéostat liquide est contenu, comme on l'a vu plus haut (fig. 590, p. 192), dans une cuve oblongue en fonte placée sous la voiture et dans laquelle descend par un tube en bois un plongeur en plomb A. Le câble auquel celui-ci est suspendu est attaché par l'intermédiaire d'une boule isolante au secteur qui commande les freins, ainsi que l'indique la figure 643.

Cette dernière figure donne en même temps, pour le cas d'un seul moteur, le schéma complet des circuits et le développement des plots des inverseurs.

Supposons l'inverseur G_1 placé dans la position indiquée et l'inverseur G

ouvert de façon à n'établir aucune connexion. Le courant arrivant du trôlet par le coupe-circuit traverse le conducteur 1, l'inverseur G_1, le conducteur 4, l'induit, le conducteur 2, l'inverseur G_1, le conducteur 3, les inducteurs du moteur, le conducteur 5, les branchements 6 et 6_1, les contacts 7 et 7_1, la résistance fixe *n*, le conducteur 10, le rhéostat liquide, les conducteurs 11, 12 et 12_1 et les contacts 9 et 9_1.

Pour que le courant puisse effectivement circuler du trôlet aux rails, il faut que l'une des manivelles *k* et k_1, communiquant avec la masse par les fils 13 et 13_1, soit amenée jusqu'à la position *p* ou p_1 qui établit le contact.

Cela posé, la manœuvre de la voiture se fait de la manière suivante : pour

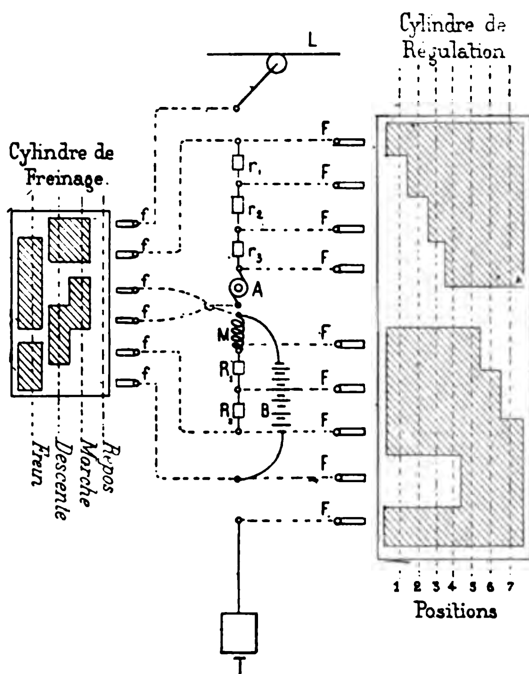


Fig 644. — Schéma d'une régulation d'un moteur étudiée par les auteurs dans le cas de l'excitation mixte.

la mise en marche, le conducteur tourne la manivelle *k* dans le sens sinistrorsum ; le premier tour desserre les freins ; le commencement du second tour laisse descendre le plongeur du rhéostat progressivement jusque sur la plaque de plomb, qui le met en court-circuit ; en amenant la manivelle à la position 7, on met hors circuit la résistance fixe *n*; enfin, en tournant plus loin, on amène le frotteur sur les plots *r*, qui shuntent les inducteurs par des résistances décroissantes ; le courant qui traverse celles-ci est conduit par le fil 14 au conducteur 3, qui reçoit le courant provenant des inducteurs.

L'inverseur permet de réaliser la marche en arrière par inversion du courant

dans l'armature; il produit aussi le freinage en fermant en court-circuit l'armature et les inducteurs groupés en série.

Régulation par excitation mixte. — Nous terminerons ces exemples de régulation par shunt par une application de la méthode d'excitation mixte décrite plus haut (p. 106) à une voiture à un seul moteur. La figure 644 donne le schéma du régulateur, formé de deux cylindres analogues à ceux de la figure 606.

Le grand cylindre a pour effet de supprimer peu à peu la résistance r, puis de shunter l'inducteur M par la batterie d'accumulateurs à bas voltage B (position 5); les positions 6 et 7 servent à recharger les accumulateurs par introduction de résistances R dans la branche M.

Le petit cylindre présente, outre l'arrêt, trois positions : la marche en avant, comme à l'ordinaire; la position de freinage, qui ferme le moteur en court-circuit ; enfin la position de descente, qui ferme les inducteurs sur la batterie et l'induit sur le réseau, de façon à réaliser la récupération.

Dans chaque position du petit cylindre, la vitesse peut être réglée à l'aide du grand.

On remarquera que les accumulateurs jouent ici le rôle de shunt, de même qu'on a vu précédemment qu'ils peuvent remplacer des rhéostats en série.

RÉGULATION PAR CHANGEMENTS DE COUPLAGE DITE SÉRIE-PARALLÈLE

La plupart des compagnies appliquent aujourd'hui, avec des dispositifs peu différents, le système des couplages variables, complété par l'emploi d'un rhéostat donnant plusieurs résistances différentes pour le démarrage et d'un shunt unique sur les inducteurs pour les grandes vitesses. Le schéma de la figure 645 représente une suite de combinaisons réalisées, par exemple, par la General Electric Co., la première qui ait adopté ce système : les combinaisons 2 et 6 sont les mêmes ; les combinaisons 7 et 8 sont aussi exactement semblables, et ce redoublement a seulement pour but de ralentir le passage de la combinaison 6 à la combinaison 8 et d'assurer en même temps une franche rupture des circuits avant le passage de série en parallèle.

Le commutateur opère, en général, les changements de couplage aussi bien que les variations de résistance; mais certains constructeurs préfèrent placer les organes de couplage sur l'inverseur et obliger le mécanicien à couper d'abord le circuit avec le commutateur avant de changer le couplage. On facilite ainsi le soufflage des arcs, mais on complique très sensiblement les manœuvres, surtout pendant le démarrage; aussi préférons-nous le premier système.

Les violentes étincelles de rupture qui se produisaient au début lorsqu'on coupait le circuit des moteurs pour les faire passer du groupement en série au groupement en parallèle, sont aujourd'hui atténuées par la mise en court-circuit de l'un des moteurs dans le cas de l'excitation en série, et en tout cas par l'insertion d'une forte résistance en série avec l'induit avant l'ouverture du circuit du moteur.

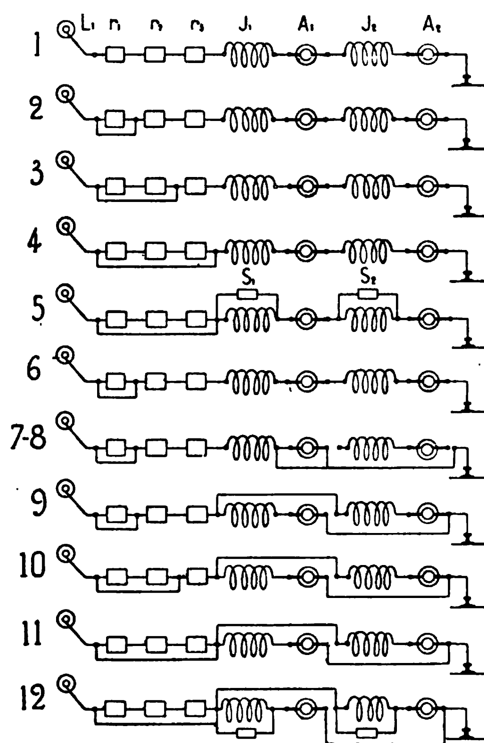


Fig. 645. — Schéma des combinaisons réalisées par le régulateur série-parallèle K2.

Le rhéostat était, à l'origine, divisé en deux parties seulement; il est préférable de le répartir en trois divisions au moins, pour réaliser des transitions plus douces; c'est ce qu'on fait généralement aujourd'hui, et l'on emploie d'autant plus de touches au rhéostat qu'il s'agit de moteurs plus puissants.

Lorsque nous aurons décrit avec détails l'un de ces systèmes, nous n'aurons que peu de chose à ajouter pour les autres. Nous commencerons donc par le plus connu, qui est le suivant.

Dispositifs de la General Electric Co. — La General Electric Co. a adapté, depuis 1892, la méthode série-parallèle à des matériels variés. Elle construit trois séries de régulateurs de ce genre, les séries K, L et B [1].

Dans la série K, un ou plusieurs moteurs sont shuntés ou mis en court-circuit au moment du changement de série en parallèle.

[1] Une quatrième série, la série R, s'applique, comme on l'a vu plus haut, au réglage par rhéostat.

Dans la série L, le circuit est complètement coupé au moment de ce changement.

Dans la série B, les régulateurs servent en même temps au freinage électrique.

Les dimensions de ces régulateurs sont très variées suivant la puissance des moteurs à gouverner; la figure 646 et le tableau de la page 238 indiquent ces dimensions pour les principaux types ; dans quelques-uns, la manette O est remplacée par un levier vertical placé sur le côté droit de la boîte.

Ces régulateurs sont généralement combinés avec l'emploi des boîtes de résistances types K et K2 : la première contient 6 panneaux en rubans de tôle, les 3 premiers de 1,5 ohm, les 3 derniers de 0,5 ohm; la seconde est divisée en quatre panneaux, les deux centraux, de 0,25 ohm chacun, reliés en série aux précé-

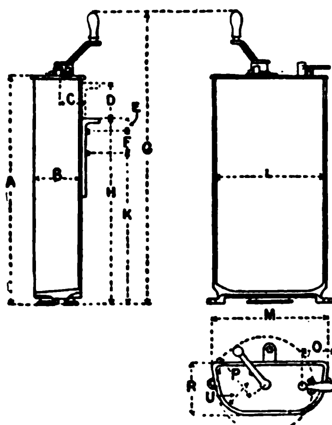


Fig. 646. — Dimensions des régulateurs de la General Electric Co. (Voir le tableau, p. 238.)

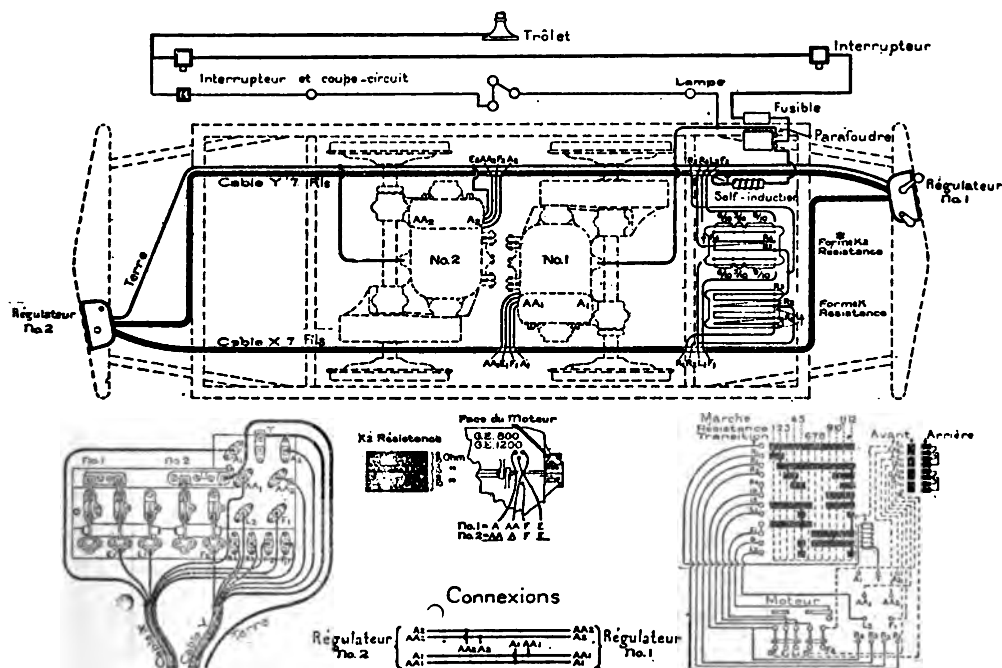


Fig. 647. — Schéma des connexions et développement des régulateurs d'une voiture de tramway à deux moteurs (matériel de la General Electric Co.).

dents, les deux latéraux, de 1,8 ohm chacun, servant de shunts; ces shunts

PRINCIPALES DIMENSIONS DES RÉGULATEURS DE LA GENERAL ELECTRIC CO.

TYPE	K	K2	K4	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K21	L2	R11	BA	B2	B3	B4	B5	B6
Nombre de moteurs . .	2	2	4	2	2	4	2	4	4	4	2	2	1	2	2	2	2	2	4
Puissance en chevaux .	35	35	35	35	50	35	125	75	125	125	50	125	50	35	50	35	50	50	35
Nombre de touches du rhéostat en série . . .	2	3	3	4	4	4	6	6	6	6	3	3	4	3	3	3	3	3	6
— en parallèle .	1	2	2	3	3	3	5	5	5	5	2	3	»	2	2	3	3	3	3
— du frein . . .	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6	6	6	6	6	6
Dimensions en mm. :																			
A	842	889	889	842	842	842	994	994	965	965	889	1 038	842	908	908	908	908	908	908
B	183	186	186	183	183	183	254	254	267	508	186	276	183	183	206	206	206	286	206
C	73	73	73	73	73	73	155	155	136	254	73	206	73	93	93	93	93	96	93
D	101	117	117	101	101	101	»	»	»	»	117	»	101	117	117	117	117	117	117
E	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	»	»	»	»	25,4	»	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4
F	89	89	89	89	89	89	»	»	»	»	89	»	89	89	89	89	89	89	89
G	1 057	1 105	1 105	1 057	1 057	1 057	1 187	1 187	1 143	1 143	1 105	1 222	1 057	1 118	1 118	1 118	1 118	1 118	1 118
H	737	737	737	737	737	737	»	»	»	»	737	»	737	737	737	737	737	737	737
K	622	622	622	622	622	622	»	»	»	»	622	»	622	622	622	622	622	622	622
L	419	422	422	419	419	419	486	578	889	483	422	638	419	483	483	483	483	483	635
M	445	445	445	445	445	445	514	604	909	502	445	689	445	498	498	498	498	498	651
O	124	124	124	124	124	124	203	203	190	203	124	»	124	124	124	124	124	124	124
P	203	203	203	203	203	203	241	241	241	241	203	241	203	229	229	229	229	229	229
R	208	208	208	208	208	208	279	279	284	527	208	295	208	224	224	224	224	224	224
S	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	476	»	»	»	»	»	»	»
V	133	133	133	133	133	133	101	101	101	101	159	»	159	165	165	165	165	165	165

sont divisés en trois sections de 0,9, 0,3 et 0,6 ohm respectivement. Grâce à ces divisions qui permettent de prendre plus ou moins de résistance, les mêmes boîtes s'appliquent à des moteurs de puissance très différente.

Nous donnerons comme exemples une régulation de voiture de tramway à deux moteurs et deux régulations de voiture à quatre moteurs.

Pour le premier cas, la figure 647 représente sous forme sché-

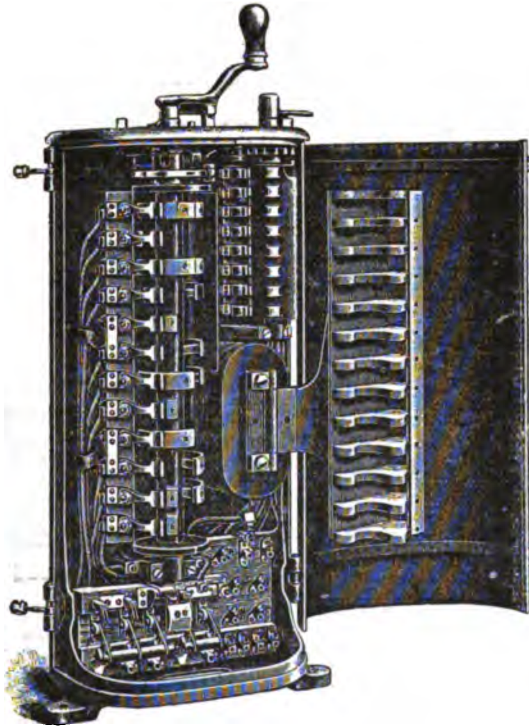


Fig. 648. — Régulateur série-parallèle K2.

matique les développements des deux cylindres (commutateur et inverseur) du régulateur type K2 et de leurs bagues sectionnées, ainsi que la disposition des circuits qui aboutissent aux divers balais, indiqués ici chacun par un petit cercle et une lettre ou un numéro d'ordre. Chacun des deux moteurs comprend sur ce schéma trois parties : un enroulement inducteur principal, le shunt correspon-

dant et l'armature. Les résistances à chaud de ces diverses parties sont, dans le cas du moteur G. E. 800 : armature 0,440; inducteurs 0,825; shunt 1,800; inducteurs shuntés 0,566 ohm.

La figure 648 montre la construction du régulateur K2, et la

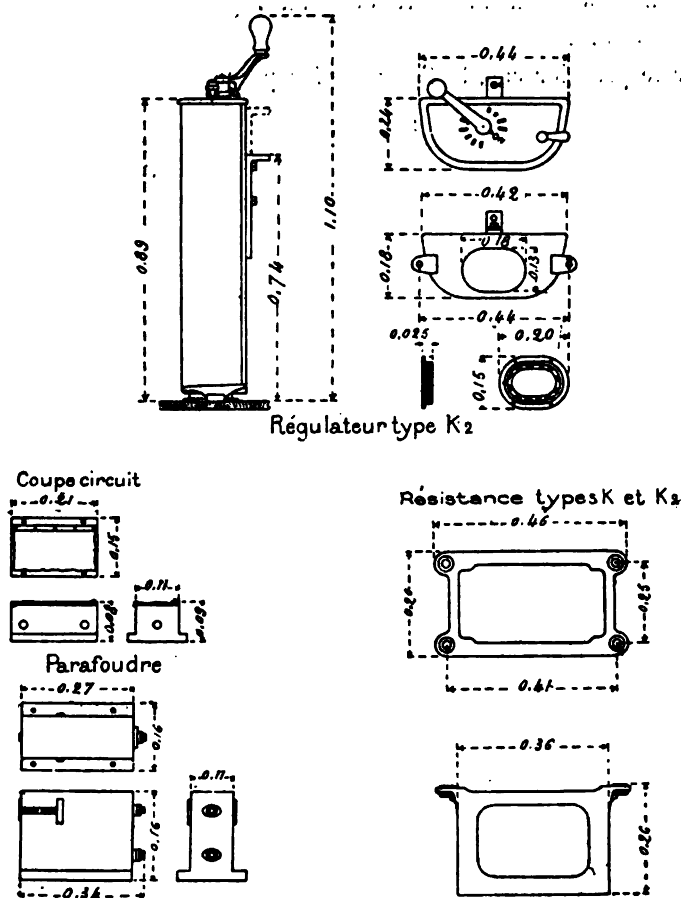


Fig. 649. — Dessins d'encombrement des divers appareils accessoires de l'équipement d'une voiture de tramway (matériel de la General Electric Co.).

figure 649 indique l'encombrement des divers organes électriques accessoires d'une voiture ainsi équipée.

Le cylindre du commutateur peut prendre 12 positions différentes, indiquées sur la figure 647 par les génératrices suivant lesquelles se fait dans chaque cas le contact des 12 balais que comporte cet

appareil. Le schéma permet de suivre rapidement le parcours du courant dans chaque position entre la borne d'arrivée et la terre (ou le rail) qui sert de retour[1]; par exemple, dans la position 9, avec l'inverseur dans la position avant, on voit que le courant arrivant en T passe directement par le cylindre au balai R_2, traverse la partie du rhéostat comprise entre R_2 et R_4 et arrive aux balais 19 et 15; là, il se partage en deux branches, l'une suivant le chemin 19 — A_1 — AA_1 — F_1 — E_1 — G_1 (terre), l'autre, le chemin tout semblable 15 — A_2 — AA_2 — F_2 — G_2 (terre); les deux moteurs sont donc en parallèle sans shunt et avec une fraction de résistance en circuit.

On trouverait de même que les autres positions réalisent bien chacune des 12 combinaisons représentées par le schéma de la figure 645, c'est-à-dire :

1° Les deux moteurs en série, avec toute la résistance	6,7 ohms.
2° Les deux moteurs en série, avec les deux premières parties de la résistance.	2,5 —
3° Les deux moteurs en série, avec la dernière partie de la résistance.	1 —
4° Les deux moteurs en série, sans résistance.	
5° Les deux moteurs en série, sans résistance, avec shunts de 1,8 ohm sur les inducteurs.	
6° Réintroduction de la même résistance qu'au 2°, puis rupture du circuit de l'un des moteurs.	
7° Un seul moteur, avec résistance de.	2,5 ohms.
8° Un seul moteur, avec résistance de	2,5 —
9° Les deux moteurs en parallèle, avec résistance de	2,5 —
10° Les deux moteurs en parallèle, avec résistance de	1 —
11° Les deux moteurs en parallèle, sans résistance.	
12° Les deux moteurs en parallèle, sans résistance, avec shunts de 1,8 ohm sur les inducteurs.	

La manœuvre du régulateur se fait à l'aide d'une manivelle munie d'un index et d'un cliquet qui indiquent son déplacement

[1] On s'aidera utilement, pour suivre les circuits, du schéma simplifié de la figure 606 (p. 206), qui se rapporte au régulateur K, lequel a seulement une touche de moins au rhéostat que le régulateur K2.

même dans l'obscurité. On doit faire mouvoir le cylindre très lentement, en ayant soin de rester un certain temps sur chaque touche. Les positions 1, 2 et 3 ne s'emploient qu'au démarrage; les positions 8 et 9 ne doivent être utilisées que comme transitions. Les meilleurs régimes pour le rendement sont les n[os] 4, 5, 10 et 12.

La figure 647 montre schématiquement en bas et à droite les connexions intérieures du régulateur, à gauche la disposition des petits tableaux. Les deux commutateurs qu'ils contiennent permettent de mettre hors circuit à volonté l'un ou l'autre des deux moteurs ; cette manœuvre est expliquée plus clairement par le schéma de la figure 650, où l'on a représenté les moteurs près des bornes où aboutissent finalement leurs circuits[1]. En marche normale, les circuits réalisent les liaisons représentées. Si le moteur 1 est endommagé, on le met hors circuit en relevant le commutateur autour de ses axes de rotation α, β, γ; dans sa seconde position, il établit une connexion directe entre les frotteurs 19 et E_1. Pour le second moteur, il suffit d'un commutateur bipolaire; en le renversant, on met le moteur hors circuit et le frotteur 15 à la terre.

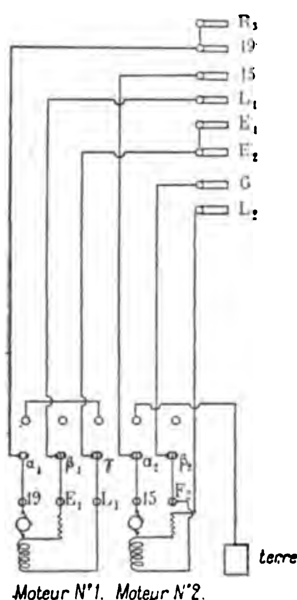


Fig. 650. — Connexions du régulateur avec les moteurs.

La figure 647 représente également la disposition d'ensemble des câbles et fils, ainsi que le conducteur d'amenée du courant à partir du trôlet et le circuit d'éclairage, qui ont été décrits plus haut (t. I, p. 396).

Un fil séparé sert à relier la borne de terre du parafoudre à la masse du truck ; le fil de terre du régulateur est mis de même à la masse par communication avec la carcasse des moteurs.

Les connexions des câbles avec les régulateurs doivent être effectuées conformément au petit schéma du bas de cette même figure

[1] Ce schéma s'applique plus spécialement au moteur K, qui diffère, comme nous venons de le dire, du type K2 par la simple suppression d'une touche de la résistance ; le reste des combinaisons est le même.

pour que la position de la manette de l'inverseur indique bien la direction de la marche de la voiture[1].

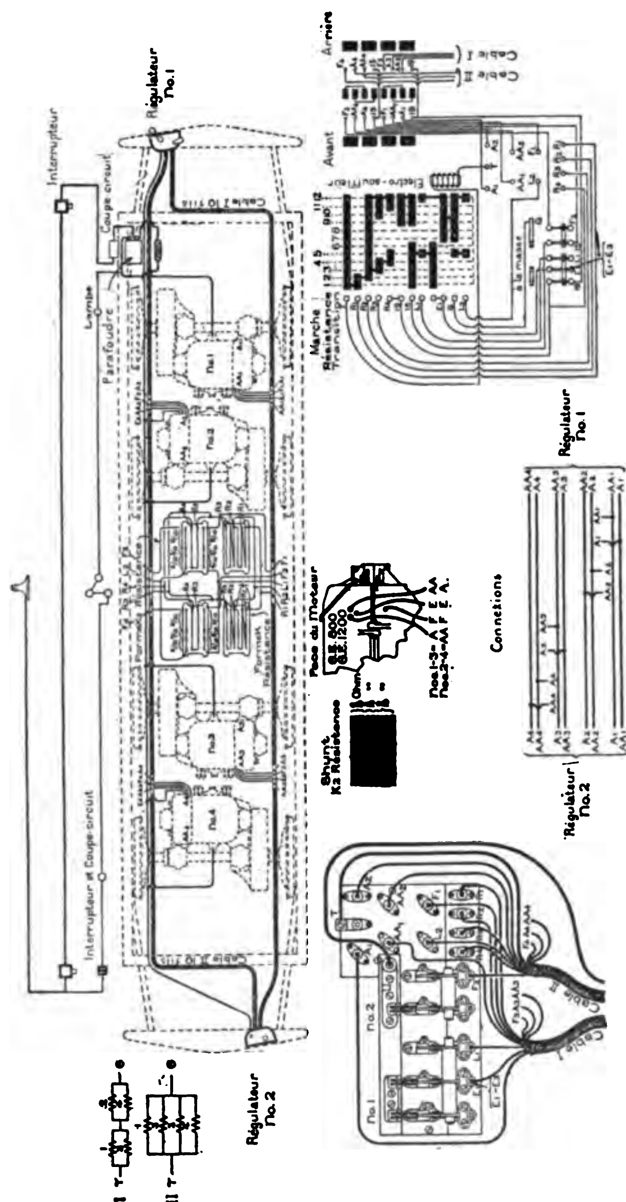


Fig. 651. — Régulation série-parallèle pour 4 moteurs avec régulateur K1.

[1] Le régulateur K2 s'adapte également à un seul moteur, en le faisant fonctionner seulement sur les 6 premières touches ; c'est alors une méthode mixte par rhéostat en série et shunt.

On trouvera plus loin, au chapitre XIV, la description du régulateur BA pour le freinage électrique.

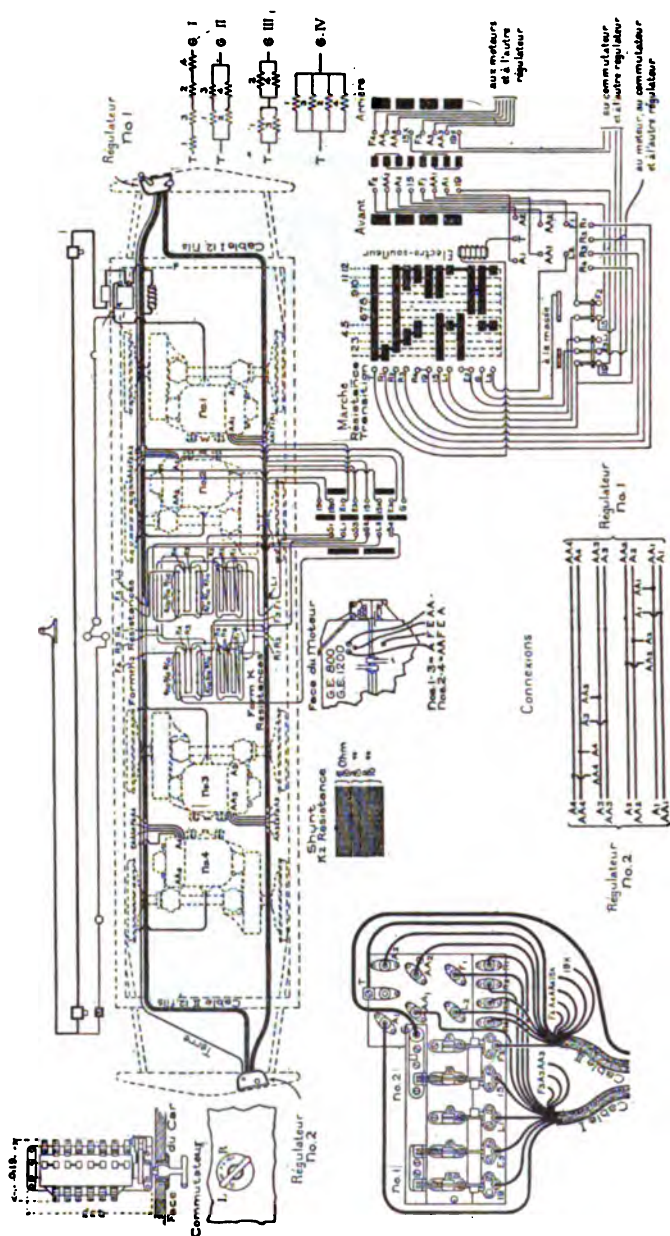


Fig. 652. — Régulation série-parallèle pour 4 moteurs avec régulateur K4B.

Les figures 651 et 652 représentent les schémas de deux régulations pour *voitures à quatre moteurs*, avec emploi des régulateurs K4 et K4B respectivement ;

les combinaisons réalisées sont indiquées en haut et dans l'angle de chacun des deux schémas. Dans le premier, les moteurs sont groupés invariablement par deux en parallèle ; dans le second, on peut changer pour chaque paire le groupement en série en groupement en parallèle à l'aide d'un commutateur spécial, représenté à part et placé sous la voiture : au sortir d'une ville, par exemple,

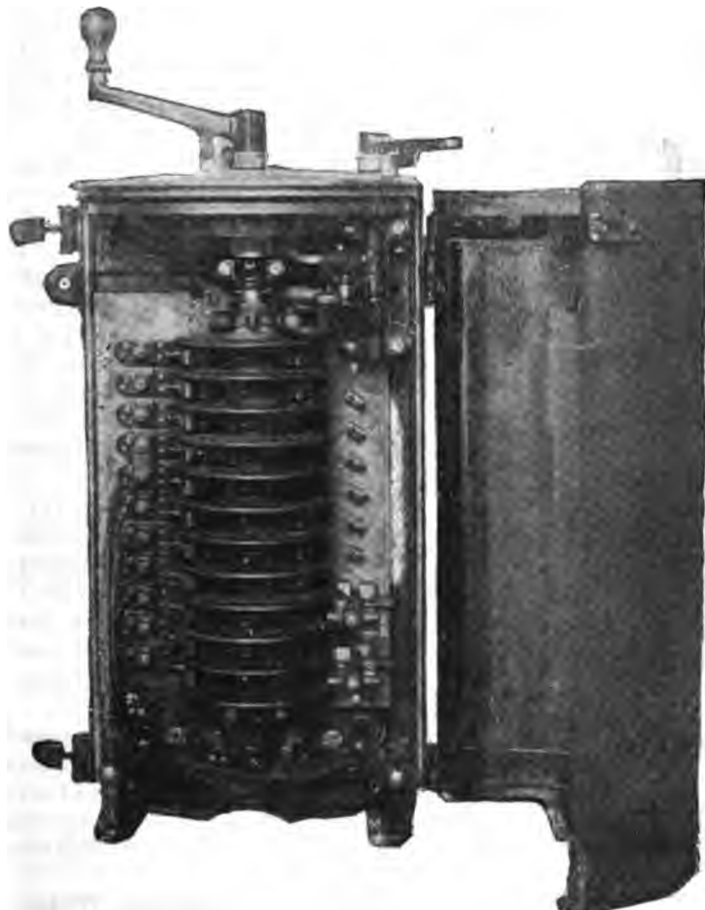


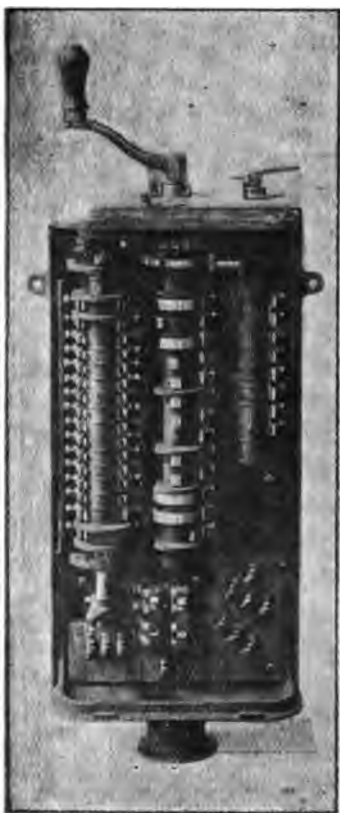
Fig. 653. — Régulateur 28 A de la Compagnie Westinghouse.

le mécanicien arrête sa voiture et va tourner la manette de ce commutateur, de façon à faire passer la vitesse du simple au double.

Les connexions s'expliquent suffisamment d'elles-mêmes pour qu'il n'y ait pas lieu d'insister davantage.

Le même matériel est construit en Europe par les Sociétés française et anglaise Thomson-Houston, et par l'Union Elektricitäts-Gesellschaft en Allemagne.

Dispositifs de la Compagnie Westinghouse. — Les dispositifs de la Compagnie Westinghouse ont suivi l'évolution commune : aujourd'hui, elle n'emploie plus que la méthode série-parallèle. Les régulateurs ordinaires nos 28 A (fig. 653) et 38 (fig. 599) sont construits, le premier pour moteurs de 25 chev. et au-dessous, le second pour moteurs de 50 chev. Les combinaisons réalisées par le 28 A sont les mêmes que celles du régulateur K2 que nous venons de décrire [1], mais la disposition du cylindre est un peu différente ; l'appareil comporte également 7 positions : lorsqu'on met un des moteurs hors circuit, le cylindre se trouve enclenché de façon à ne pouvoir dépasser la position 4.


Fig. 654. — Régulateur Walker, type E.

Ces régulateurs étaient construits autrefois avec des bagues en cuivre fixées sur des anneaux en porcelaine ; aujourd'hui, la Compagnie Westinghouse emploie plus simplement des bagues en fonte enfilées sur un arbre en acier de section rectangulaire dont elles sont isolées par une épaisse couche de mica ; elles sont séparées entre elles par des cloisons de vulcanite et recouvertes de pièces de contact en cuivre qui peuvent être remplacées après usure.

Le régulateur n° 38 (fig. 599, p. 197) ne diffère du 28 A que par ses dimensions plus grandes et l'addition de 4 bagues permettant des variations mieux graduées de la résistance ; il y a 8 positions pour la manette au lieu de 7, les 4 premières pour la marche en série, les 4 dernières pour la marche en parallèle.

La même compagnie construit pour les puissances plus grandes des régulateurs analogues ; elle en a établi aussi à trois cylindres (fig. 601, p. 201) pour les locomotives exécutées par les Ateliers Baldwin.

Dispositifs de la Compagnie Walker. — Les combinaisons réalisées par le matériel Walker restent encore sensiblement les mêmes, mais le régulateur a subi des changements si fréquents qu'il est difficile de les suivre. Au début, il présentait comme dispositif original l'extinction des arcs par multiplication des points de rupture (voir p. 200). Dans le modèle E, représenté par les figures 600, 654

[1] Au début, les combinaisons réalisées étaient un peu différentes et imposaient, dans certaines positions, des régimes inégaux aux deux moteurs ; on y a complètement renoncé par suite des inconvénients de cette inégalité. On trouvera des schémas de ces premiers dispositifs dans un article de la *Lumière Électrique* du 21 juillet 1894, p. 107 et 108, par M. G. Pellissier.

et 655, on fait intervenir un cylindre interrupteur spécial, placé sur la gauche de la boîte et comprenant 32 contacts divisés en 2 rangées diamétralement opposées et connectés deux à deux ainsi que les frotteurs. Le fil du trôlet aboutit au quatrième frotteur à partir du bas, et le courant se divise entre les deux chemins qui lui sont ouverts, la majeure partie empruntant celui du bas, dont la résistance est moindre; ces contacts inférieurs sont rompus un peu avant les autres, et la dernière rupture a lieu sur les 28 touches du dessus.

Lorsqu'on met la voiture en marche, la manette principale étant au zéro, on commence par fermer le circuit par le cylindre interrupteur, puis on avance progressivement la manette de manière à réaliser les combinaisons successives de la figure 656, qui donnent des vitesses croissantes; dans ce mouvement, les

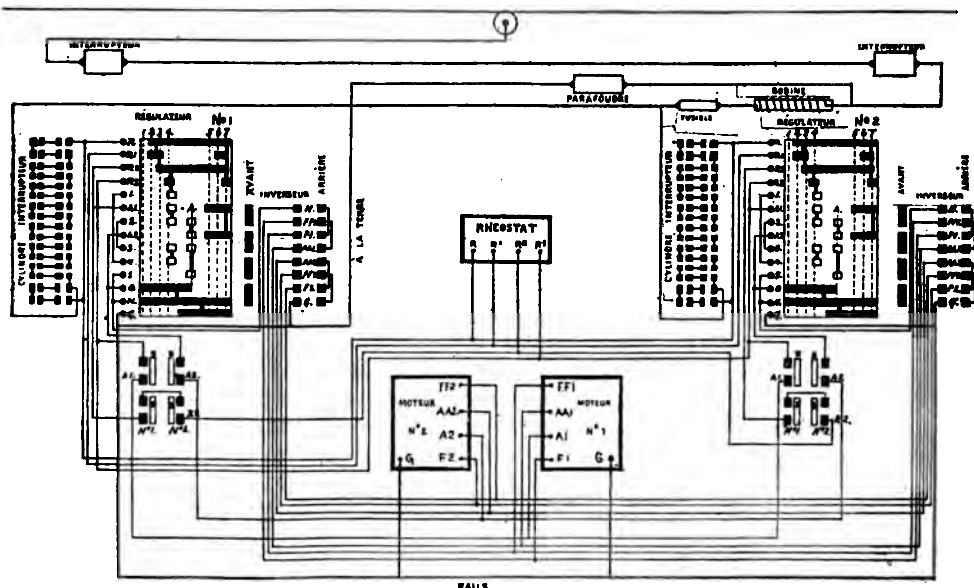


Fig. 655. — Schéma de la régulation Walker avec régulateur E.

contacts multiples du cylindre commutateur suffisent à éviter les arcs; mais il n'en serait pas de même pour le mouvement en sens inverse; aussi les deux cylindres sont-ils solidarisés par un encliquetage qui ramène le cylindre interrupteur au zéro dès qu'on déplace le commutateur en arrière (voir p. 203).

Les dispositions réalisées pour la mise hors circuit d'un des moteurs en cas d'avarie sont différentes de celles des régulateurs précédents : l'ouverture d'un des deux interrupteurs enclenche le cylindre de façon à ne permettre le fonctionnement que dans la marche en parallèle; à cet effet, la manœuvre de l'interrupteur de l'un quelconque des moteurs, en même temps qu'elle rompt le court-circuit entre R_1 et R_2 de façon à rétablir une résistance suffisante, ouvre le circuit en R_2; il n'est refermé qu'à partir de la 5e position.

Dans un régulateur plus récent, type J, les contacts de rupture sont au nombre de 8 seulement et disposés sur le cylindre commutateur, qui ne

diffère de celui de la figure 655 que par la mise en parallèle des résistances à l'avant-dernière position.

Dans le type S on a renoncé au principe des interruptions multiples pour adopter celui du soufflage magnétique par des solénoïdes logés entre les segments de contact. La figure 657 indique schématiquement la disposition du régulateur et des connexions. On remarquera que l'inverseur comprend, en plus des positions ordinaires, des positions supplémentaires qui permettent de mettre à volonté hors circuit l'un ou l'autre des moteurs ou de les fermer en court-circuit sur un rhéostat de façon à réaliser le freinage électrique; pour amener la manette sur cette dernière touche, il faut développer un effort anormal.

La manette du cylindre inverseur est enclenchée, soit par celle du commutateur à la manière ordinaire, soit, dans le dernier type, par un électro-aimant en série qui ne permet de manœuvrer l'inverseur qu'en l'absence de tout courant.

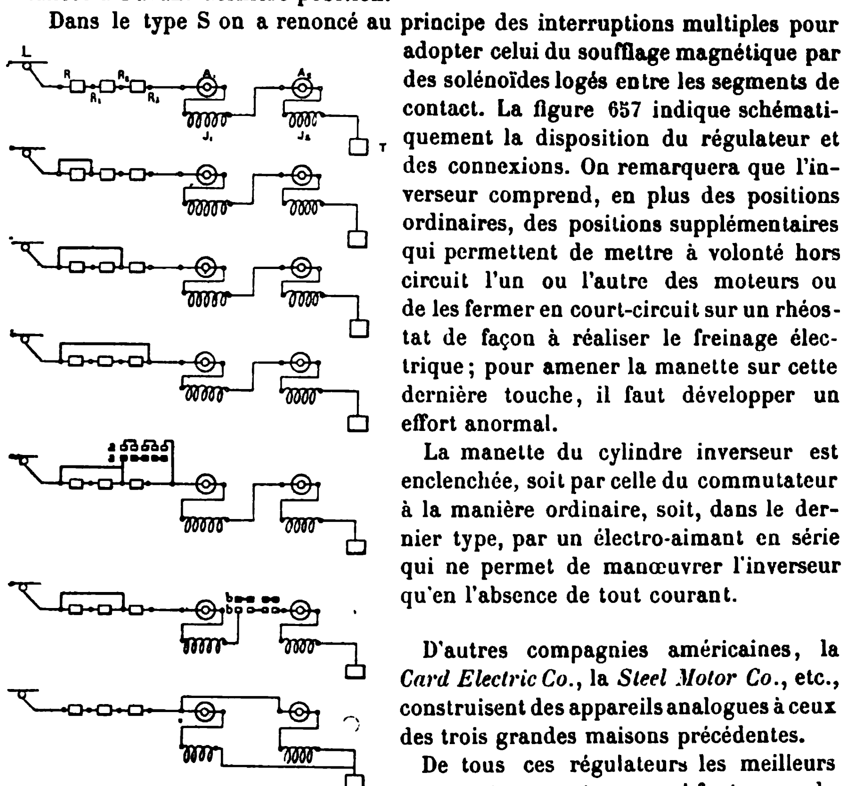


Fig. 656. — Combinaisons réalisées par le régulateur Walker, type E.
aa, *bb*, contacts auxiliaires pour la rupture des arcs.

D'autres compagnies américaines, la *Card Electric Co.*, la *Steel Motor Co.*, etc., construisent des appareils analogues à ceux des trois grandes maisons précédentes.

De tous ces régulateurs les meilleurs sans conteste sont ceux qui font usage du soufflage magnétique.

Dispositifs de Siemens et Halske et de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques. — Le régulateur série-parallèle de Siemens et Halske et de la Société Alsacienne, qui est le premier de son espèce en Europe, se distingue des types précédents par plusieurs dispositions originales et fort ingénieuses, notamment par l'emploi de leviers à cames et de contacts en charbon faciles à remplacer.

Il comprend à sa partie supérieure (fig. 658 et 659) douze leviers portant à leur extrémité des blocs de charbon sollicités par des ressorts à boudin à venir s'appuyer sur d'autres blocs semblables maintenus dans des supports en fonte, et à sa partie inférieure quatre leviers doubles, articulés en leur milieu, qui peuvent venir s'appliquer d'un côté ou de l'autre sur des blocs de charbon. Les supports des leviers et des blocs sont isolés et fixés sur des plaques en stabilité.

L'arbre A commande les huit leviers supérieurs par des cames en bronze fixées sur une douille en bois et les quatre leviers doubles inférieurs par l'intermédiaire d'une biellette sur laquelle agit une came calée sur l'arbre A;

l'arbre B soulève par des cames spéciales les quatre leviers intermédiaires 9, 10, 11 et 12.

Un encliquetage spécial, déjà décrit plus haut (p. 203) et dont l'échappement est commandé par l'arbre A, ne permet pas de faire dépasser à cet arbre un

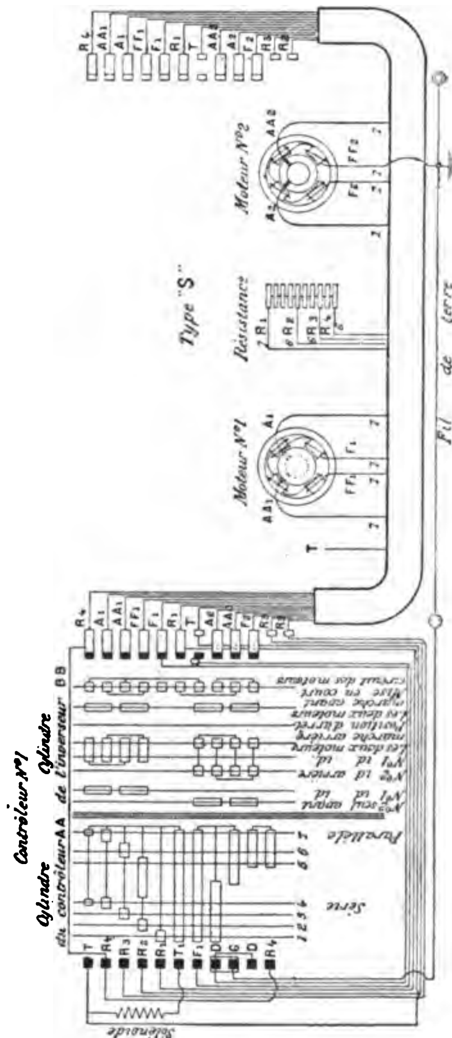


Fig. 657. — Schéma du régulateur Walker, type S, et de ses connexions.

certain cran sans que l'arbre B revienne au zéro sous l'action d'un ressort de rappel placé au haut de l'appareil, mettant ainsi toute la résistance en circuit.

Entre les huit premiers leviers se trouve une plaque aimantée destinée à souffler les arcs qui tendent à se former.

Ces huit leviers servent au couplage des moteurs en série ou en parallèle, et les quatre leviers doubles inférieurs déterminent la marche en avant ou en

arrière ; les deux leviers 9 et 10 commandés par l'arbre B introduisent des résistances en série, et les deux autres, 11 et 12, servent à shunter les inducteurs.

Les combinaisons employées sont les mêmes que dans les régulateurs américains.

Pour marcher en avant, on tourne l'arbre A dans le sens inverse des aiguilles d'une montre : les leviers qui déterminent le groupement en série s'abaissent et les leviers doubles se placent dans la position de la marche en avant. Pour augmenter la vitesse, on tourne d'un cran l'arbre B dans le sens

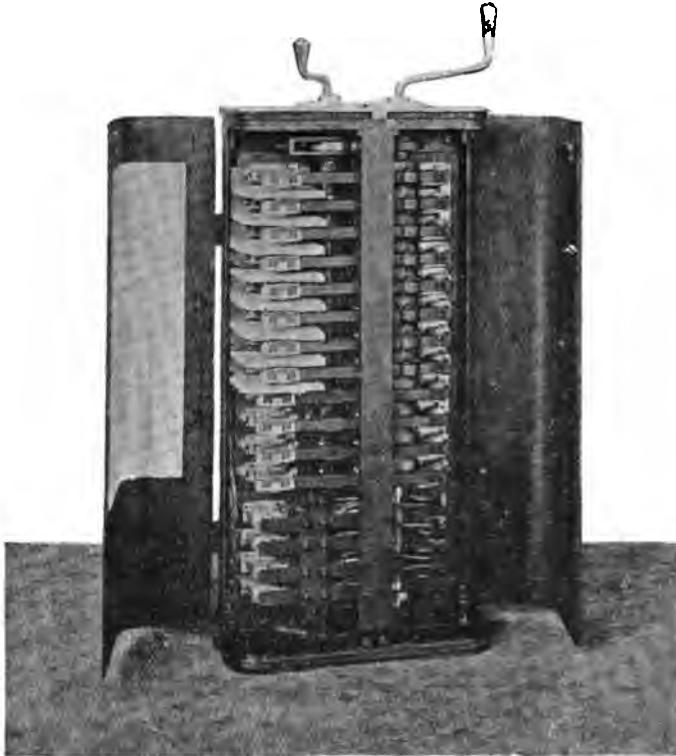


Fig. 658. — Régulateur de la Société Alsacienne, type Siemens et Halske. Vue intérieure.

des aiguilles d'une montre : le levier 9 est abaissé et une partie de la résistance est mise en court-circuit ; au cran suivant, le levier 10 s'abaisse et la résistance est totalement éliminée ; ensuite, les leviers 11 et 12 s'abaissent simultanément et shuntent les inducteurs.

Pour passer à une vitesse plus grande, le mécanicien fait tourner d'un nouveau cran l'arbre A : pendant ce mouvement, tous les leviers simples sont soulevés, le cliquet d'arrêt de l'arbre B est dégagé et cet arbre revient au 0, puis tous les leviers qui correspondent au couplage des moteurs en parallèle s'abaissent et l'on obtient une nouvelle vitesse. Pour accélérer encore la marche, il

suffit de manœuvrer l'arbre B de façon à supprimer toutes les résistances et à shunter les moteurs.

Il y a donc, comme on le voit, pour la marche en avant, deux positions de l'arbre A, correspondant l'une au couplage en série et l'autre au couplage en parallèle, et, dans chacune de ces positions, une vitesse plus trois modifications données par la manœuvre de B, ce qui fait en tout huit vitesses différentes.

Pour arrêter, il suffit de ramener la manette A en arrière : les moteurs reviennent d'abord au couplage en série, puis sont complètement coupés.

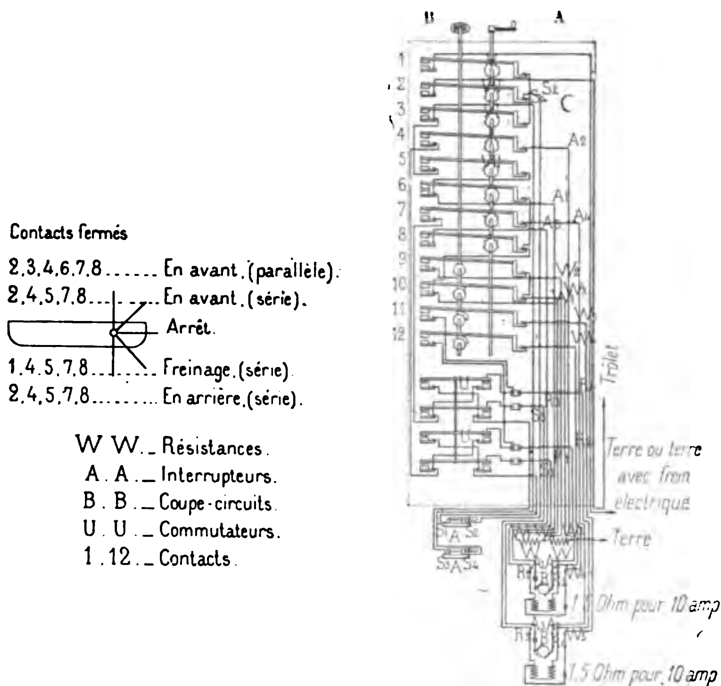


Fig. 659. — Régulateur de la Société Alsacienne. — Schéma des connexions.

Si l'on dépasse la position d'arrêt pour reculer d'un nouveau cran, on arrive au freinage : les moteurs sont alors groupés en série et débitent comme génératrices sur le rhéostat. Enfin, on obtient la marche en arrière en faisant encore reculer la manette A d'un cran : les moteurs restent couplés en série et les leviers doubles se placent dans la position de la marche en arrière.

Ce régulateur, très bien compris, présente les mêmes avantages que les régulateurs américains, bien que le rôle des deux manettes soit un peu différent. De plus, tous les contacts étant en charbon, les pièces ne peuvent se coller les unes contre les autres comme il arrive quelquefois dans les appareils munis de touches en métal. On a encore perfectionné récemment l'appareil en supprimant tout passage de courant par les axes.

Le même régulateur est utilisé dans le cas où la voiture ne possède qu'un seul moteur; le coupleur A agit alors sur les inducteurs du moteur.

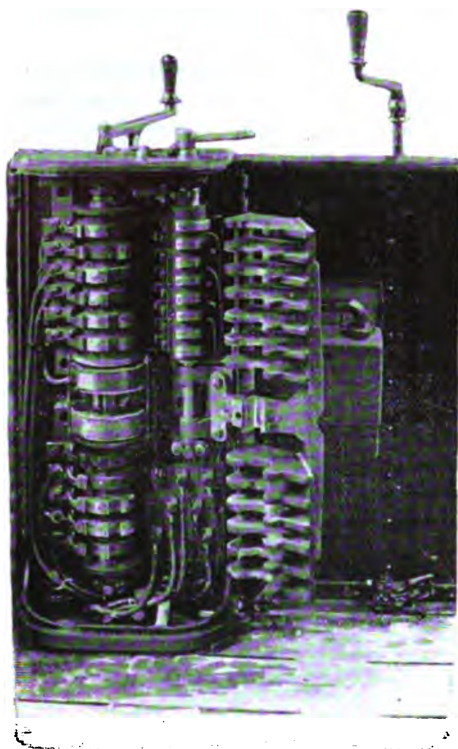


Fig. 660. — Régulateur de la Société d'Oerlikon.

Autres régulateurs série-parallèle construits en Europe. — Après quelques années de retard, les constructeurs européens se sont mis presque tous à établir des régulateurs série-parallèle analogues aux types américains. Il nous paraît inutile, après ce qui précède, de les décrire et nous nous contenterons de signaler parmi les mieux étudiés celui de *Ganz*, celui d'*Oerlikon*, intéressant par la disposition de son souffleur magnétique (fig. 660), ceux de *Thury* (le Creusot), *Schuckert*, *Thomas Parker*, etc.

Nous donnerons seulement deux exemples de construction française assez originaux, l'un pour 2, l'autre pour 4 moteurs.

Le régulateur primitif des voitures de Romainville (fig. 661), système *Claret-Vuilleumier*, construit par la maison *Clémançon*, se composait de trois parties : un commutateur principal cylindrique à contacts de cuivre montés avec interposition d'isolant sur un cylindre de fonte, un inverseur

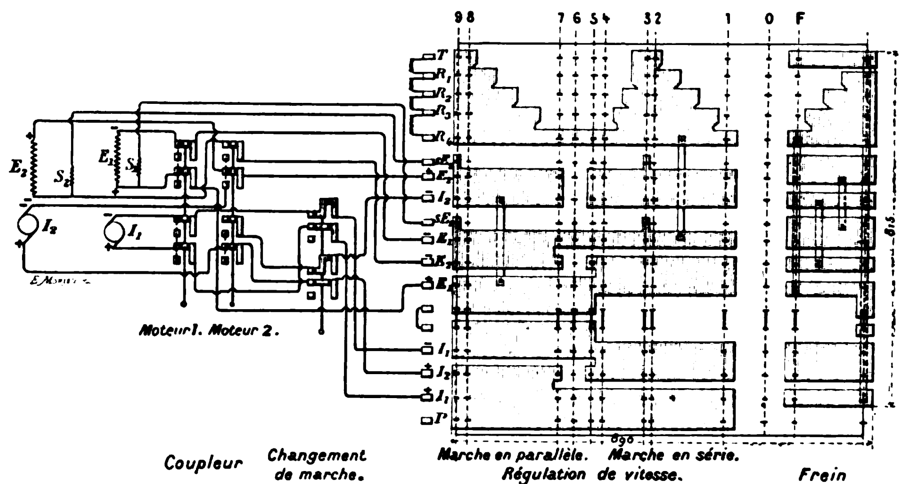


Fig. 661. — Schéma du régulateur primitif et des connexions des voitures de Romainville.

plan, analogue à celui de la figure 594 (p. 194), et un coupleur permettant de mettre à volonté chacun des moteurs hors circuit. Le grand cylindre réalisait les combinaisons ordinaires des régulateurs américains; il comportait un plus grand nombre de touches au rhéostat et donnait, par suite, une grande douceur de fonctionnement ; en outre, il permettait un freinage très gradué par mise en court-circuit des moteurs sur le rhéostat. Cet appareil était bien conçu, mais exécuté d'une façon moins robuste que les précédents.

Le régulateur *Thury* pour 4 moteurs de 25 chevaux (fig. 662), construit

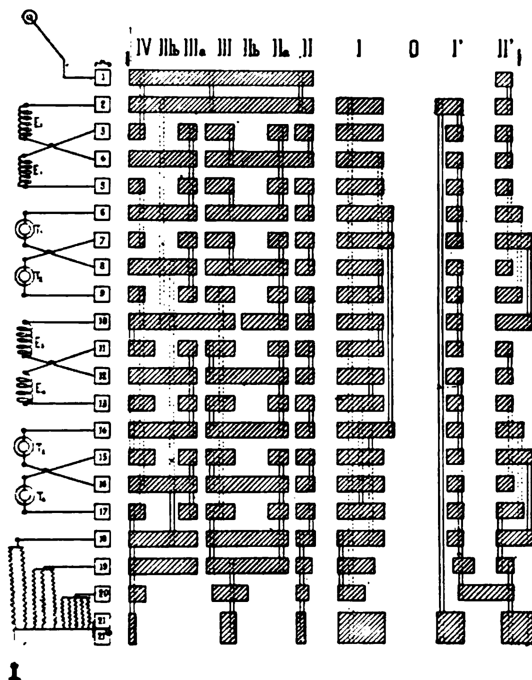


Fig. 662. — Schéma du régulateur et des connexions des voitures à 4 moteurs de Pierrefitte-Cauterets.

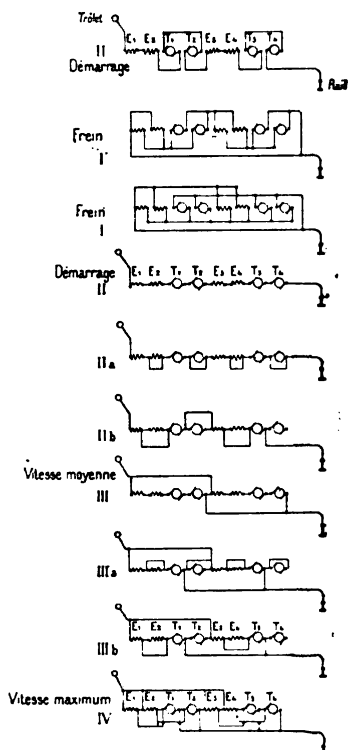


Fig. 663. — Combinaisons réalisées par le régulateur de la figure précédente.

par les *Usines du Creusot* pour les voitures des lignes de Pierrefitte à Cauterets et à Luz, est un exemple très intéressant de régulation série-parallèle complète et vraiment rationnelle pour 4 moteurs. Il se distingue des types américains décrits ci-dessus en ce qu'il réalise, à l'aide d'un seul cylindre, les trois combinaisons fondamentales, fort utilement complétées par le freinage électrique. La figure 662 donne le développement du cylindre et les connexions des frotteurs, et la figure 663 indique la série des combinaisons réalisées dans chaque position. Ce régulateur, solidement construit, constitue un excellent dispositif pour matériel de chemins de fer et assure le maximum d'économie au démarrage.

Au lieu de faire les changements de couplage des moteurs par le cylindre principal qui introduit les résistances, nous avons vu que le régulateur Siemens les exécute par le cylindre inverseur. Quelques autres constructeurs suivent les mêmes errements, par exemple la maison *Kummer*, dont le régulateur est appliqué notamment sur les voitures des tramways de Paris et du département de la Seine équipées par la Société *Heilmann;* cet appareil, décrit plus haut (p. 231) dans le cas d'un seul moteur, est complété ici par l'addition sur le cylindre inverseur des connexions et bagues indiquées sur la figure 664.

Cette disposition est aussi bonne que les précédentes, bien qu'elle exige peut-être un peu plus d'attention de la part du mécanicien au moment du démarrage.

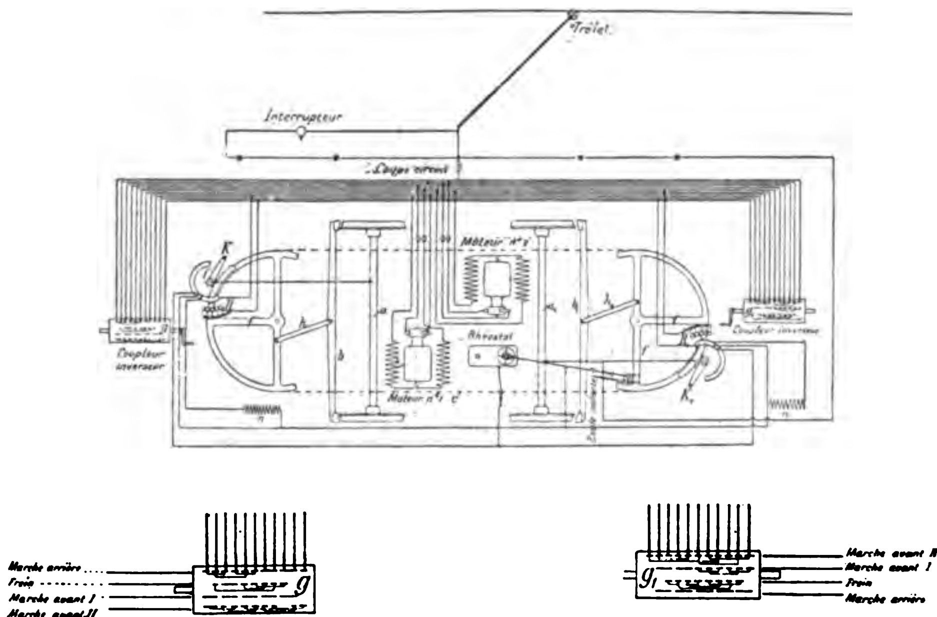


Fig. 664. — Régulation série-parallèle de la maison Kummer. — Schéma des appareils, des circuits et des freins.

Régulation série-parallèle pour l'excitation en dérivation. — La figure 665 montre une série de combinaisons qu'on pourrait réaliser par la méthode série-parallèle avec des moteurs excités en dérivation. Ces combinaisons seraient exécutées par le grand cylindre. La figure 666 représente le développement et les connexions du régulateur, dont la construction serait analogue à celle des appareils précédents; elle serait même plus simple à résultat égal, grâce à la réduction de l'inverseur et à la suppression de plusieurs touches sur le cylindre principal; le petit cylindre inverseur serait construit comme l'indique la figure 596 (p. 195), pour éviter les

étincelles de rupture et forcer le mécanicien à établir le champ magnétique avant d'envoyer le courant dans les induits.

Dans la position —1, correspondant au freinage, les inducteurs sont excités par le courant de la ligne; on pourrait aussi maintenir l'excitation assurée en la prenant aux bornes du rhéostat sur lequel les moteurs sont fermés en série. Cette dernière disposition permettrait de freiner même en cas de déraillement du trôlet; mais elle a l'inconvénient de réduire beaucoup la puissance du freinage, car la résistance du circuit principal qui détermine le courant dans les induits ne peut descendre au-dessous du double de ce qu'elle serait en fermant les armatures en série directement sans rhéostat; en outre, elle ne permet de disposer pour l'excitation que de la moitié de la f. é. m. totale développée dans les moteurs. Cependant, sur les lignes à déclivités dangereuses, il serait prudent de prévoir l'auto-excitation comme secours, en vue de l'éventualité où l'excitation par la ligne viendrait à manquer : il suffirait à cet effet d'ajouter au petit cylindre une quatrième position.

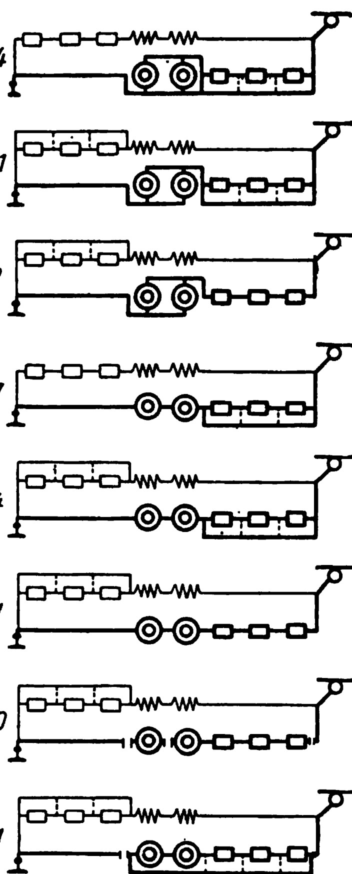


Fig. 665. — Combinaisons réalisables par la régulation série-parallèle avec excitation en dérivation.

***Régulation des locomoteurs de l'État belge.*— L'administration des chemins de fer de l'État belge a adopté, sur les plans de M. *E. Gérard*, l'excitation en dérivation pour ses essais de trains-tramways[1] : la régulation s'opère, comme dans les systèmes Siemens et Kummer décrits ci-dessus, à l'aide de deux organes, un modérateur qui insère des résistances décroissantes en série avec les induits, puis des résistances croissantes dans le circuit des inducteurs, et un appareil de changement de marche qui sert à la fois d'inverseur et de coupleur.**

[1] Cf. Note de M. Auvert au *Congrès international des Chemins de fer*, Londres, 1895. Dans ces essais, la source d'électricité a été constituée provisoirement par une batterie d'accumulateurs à 500 volts.

Cet appareil est du type à commutateur plan, comme le régulateur Wightman (p. 196), mais les frotteurs, qui sont doubles, appuient à la fois sur deux plateaux en ardoise dont ils mettent en communication les plots opposés. Les plots et lames des plateaux sont en cuivre, sauf les touches du rhéostat d'induits qui sont en fer, ainsi que les frotteurs correspondants, pour réduire l'effet destructif des étincelles. La figure 667 montre la coupe transversale de l'appareil et les deux plateaux rabattus de chaque côté pour faire voir leur face interne; les coupes des frotteurs, dont l'un a la forme d'une pince de homard, sont représentées séparément.

Les connexions des plots avec les diverses parties de l'équipement, moteurs et rhéostats, sont figurées schématiquement en pointillé sur le même dessin et

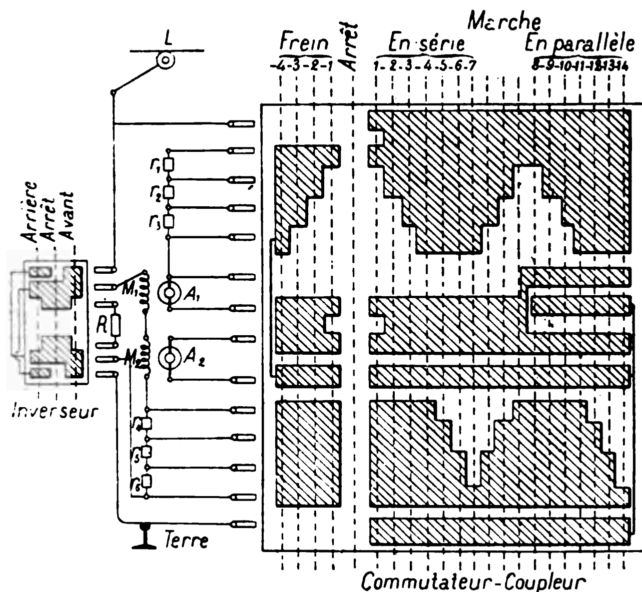


Fig. 666. — Schéma d'un régulateur série-parallèle étudié par les auteurs pour l'excitation en dérivation

s'expliquent d'elles-mêmes. Les inducteurs sont excités en dérivation et on ne peut les mettre hors circuit que par un interrupteur qui introduit préalablement les résistances croissantes d'un rhéostat R_3 d'environ 1000 ohms.

Le levier *modérateur* L_1, à l'extrémité arrière de sa course, coupe le circuit sur la dernière touche en fer, au droit d'un électro-aimant qui souffle l'étincelle de rupture. Quand on le déplace vers l'avant, il ferme le circuit sur des résistances décroissantes (rhéostat de 15,28 ohms de résistance totale avec 16 divisions; résistance des connexions, 0,67 ohm). Dans sa position verticale C, les résistances sont entièrement supprimées. En poussant le levier davantage dans la direction AV, on met des résistances de shunt décroissantes en dérivation aux bornes des inducteurs (rhéostat de 17 touches et 108 ohms de résistance totale); enfin, quand le levier est arrivé à fond de course, le champ est réduit aux deux tiers de sa valeur normale.

Le levier *coupleur-inverseur* L_2 a 5 positions :

C, point neutre ;

S et P, couplage en série et couplage en parallèle, marche en avant ;

S′ et P′ — — — — marche en arrière.

Ces deux leviers sont solidarisés par un encliquetage formé d'une came basculante à ancre, qui ne permet de mouvoir le levier coupleur qu'après avoir ramené le modérateur à fond de course, ce qui coupe le circuit. Pour mettre la voiture en vitesse, il faut donc coupler les moteurs en série, pousser peu à peu

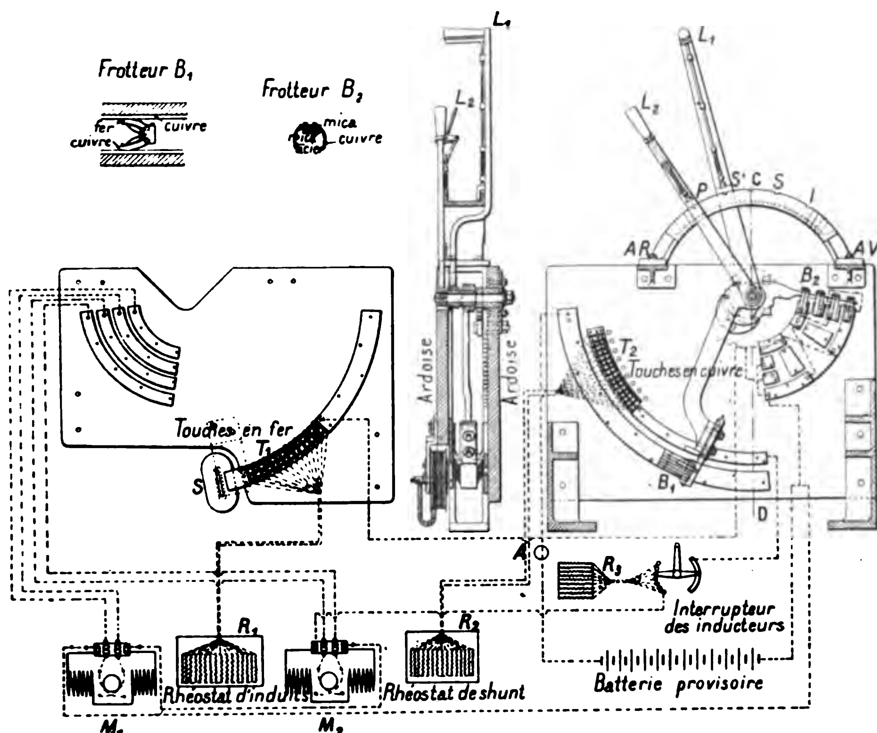


Fig. 667. — Régulateur de l'État belge et schéma des connexions.

le modérateur à fond de course, le ramener brusquement en arrière, changer le couplage et manœuvrer de nouveau le modérateur. Comme nous l'avons dit plus haut (p. 235), nous préférons à ce dispositif le système américain, qui ne demande que des manœuvres beaucoup plus simples.

Le courant maximum admis par moteur pendant le démarrage était de 90 à 100 ampères sous 500 volts et la vitesse maxima de 60 km : h. Chaque moteur de 50 — 100 chev. avait les résistances suivantes : induit, 0,71 ohm à froid et 0,78 ohm à chaud ; inducteurs, 39 ohms à froid et 42, 7 ohms à chaud.

Les mêmes dispositions ont été conservées pour les nouveaux locomoteurs plus puissants de la même administration dont nous reproduisons la spécification en annexe, mais une partie des résistances d'induit est constituée par des

spires inductrices en gros fil intercalées en série avec les induits pendant la période de mise en vitesse, afin de renforcer le champ.

Nous n'insisterons pas sur cet emploi des moteurs en dérivation, dont nous avons déjà signalé les difficultés pratiques (voir p. 96).

Régulation série-parallèle pour l'excitation mixte. — L'excitation mixte décrite ci-dessus (p. 106) peut aussi se combiner avantageusement avec la régulation série-parallèle. La figure 668 représente le développement d'un régulateur que nous avons étudié dans ce but et la figure 669 le schéma des principales combinaisons réalisées. Le grand cylindre produit les combinaisons ordinaires des régulateurs série-parallèle américains, dans lesquelles les shunts sont remplacés par deux petites batteries d'accumulateurs B_1 et B_2 ; celles-ci restent hors circuit, sauf dans les positions 5, 6, 14 et 15, où elles sont mises en dérivation aux bornes des inducteurs; dans les positions 14 et 15, des résistances sont ajoutées éventuellement aux inducteurs pour faire passer plus de courant dans les batteries et les recharger si c'est nécessaire.

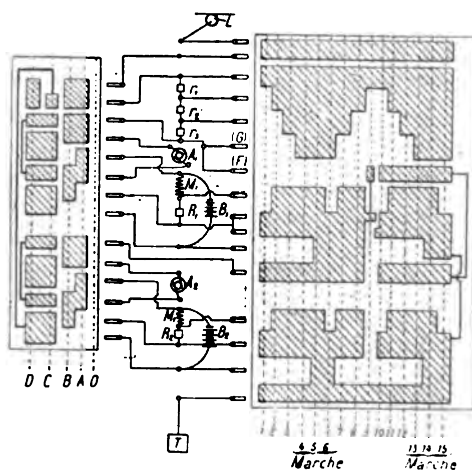


Fig. 668. — Schéma d'un régulateur série-parallèle étudié par les auteurs pour l'excitation mixte.

Le petit cylindre sert à produire l'inversion, la récupération et le freinage.

La position A correspond à la marche en avant.

Dans la position B (récupération), qu'on emploie sur les pentes ou pour ralentir la vitesse, les induits sont séparés des inducteurs et en relation directe avec la ligne d'alimentation; en plaçant le grand cylindre dans la position 5, 6, 14 ou 15, on ferme chaque inducteur M^1, M^2 sur la batterie correspondante, qui maintient l'excitation et permet aux induits de renvoyer du courant dans la ligne. On dispose ainsi de 4 régimes de récupération, dont le meilleur pour ralentir est le n° 5.

Dans la position C (freinage), les deux moteurs sont fermés en court-circuit sur le rhéostat; on règle l'action du frein par le grand cylindre.

La position D (marche en arrière) est la même que la position A, sauf que le courant est inversé dans les induits.

Les deux cylindres sont enclenchés à la manière ordinaire.

Ce régulateur est destiné aux voies à fortes déclivités, ainsi qu'aux voies à déclivités modérées où l'on désirerait une grande constance de vitesse, comme par exemple sur les chemins de fer. Il s'appliquerait particulièrement bien aux voitures à accumulateurs, sur les lignes en palier ou en rampe. On l'emploierait exactement comme les régulateurs américains, et l'on obtiendrait

de même un démarrage économique, pendant lequel les accumulateurs ne travailleraient pour ainsi dire pas. Dans les sections en palier ou en faible pente, en se mettant sur la position 5 ou 14, on obtiendrait la constance de la vitesse. Enfin, sur les fortes pentes, on ralentirait en plaçant le petit cylindre dans la position B; de même à l'approche des stations avant d'appliquer les freins.

Comme nous l'avons déjà dit (p. 108), la condition essentielle pour que ce système fonctionne bien, c'est que la f. é. m. de la batterie soit choisie de façon que la décharge et la charge s'équilibrent chaque jour; l'emploi des résistances R_1 et R_2 permet au besoin de compléter la charge en marchant quelque temps sur la touche 6 ou 15 sous forte charge.

Ce dispositif donne, plus simplement que le compoundage, une solution du

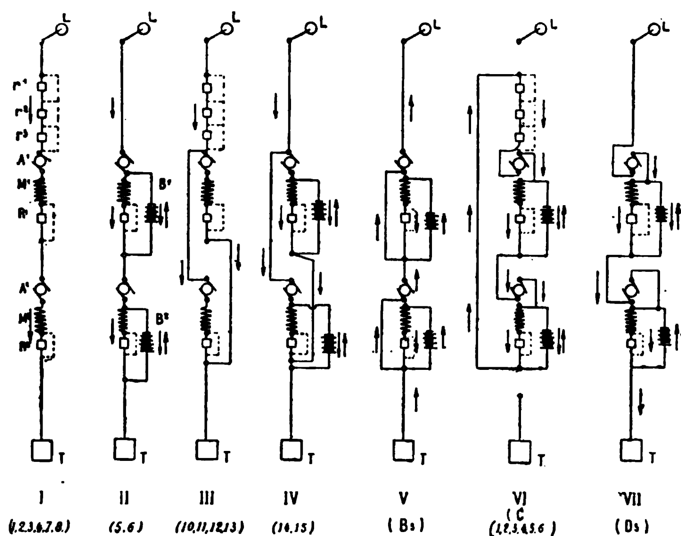


Fig. 669. — Combinaisons réalisables par le régulateur de la figure précédente.

problème posé par l'administration des chemins de fer de l'État belge, à savoir de concilier la constance de vitesse réalisée par l'excitation en dérivation avec le renforcement de champ au démarrage que procure l'excitation en série ; il n'exige d'ailleurs que de très petites batteries, comparables à celles qu'on emploie dans certains cas pour l'éclairage des voitures.

La solution serait plus parfaite encore si l'on remplaçait les deux batteries par les deux enroulements secondaires d'un petit transformateur à courant continu formé par la réunion d'un petit moteur alimenté par le trôlet et d'une génératrice à double induit. On supprimerait alors les résistances R et l'on disposerait, au contraire, un rhéostat d'excitation sur cette génératrice de façon à régler à volonté la force électromotrice aux bornes des inducteurs. Lorsqu'on réduirait cette force électromotrice au-dessous de la valeur normale, une partie plus ou moins considérable du courant principal des induits des moteurs se trouverait dérivée à travers la petite dynamo et l'on modifierait

ainsi à la demande le champ magnétique des moteurs plus facilement qu'avec l'excitation en dérivation. La petite dynamo renverrait à la ligne l'énergie qu'elle recevrait ainsi et qui serait toujours peu importante.

Ce dernier dispositif pourrait, croyons-nous, être appliqué avec avantage à la régulation des grandes locomotives électriques. On remarquera qu'il permet l'emploi de moteurs en série ordinaires et qu'en cas d'accident au petit transformateur excitateur, ces moteurs pourraient continuer à fonctionner sans aucune chance d'arrêt, ce qui n'est pas le cas avec l'excitation séparée ordinaire.

RÉGULATION DES TRAINS COMPRENANT PLUSIEURS AUTOMOBILES

Lorsque les trains comportent seulement deux ou quatre moteurs, comme c'est le cas, par exemple, sur certains métropolitains, les dispositifs précédents peuvent s'appliquer, à la seule condition d'établir des connexions entre les voitures pour commander tous les moteurs à l'aide d'un seul régulateur. Mais, au delà de deux voitures, le mieux est d'attribuer à chacune un régulateur série-parallèle distinct et d'actionner tous ces appareils par une seule transmission, comme l'a proposé dès 1885 M. *F. J. Sprague*.

Le système le plus simple qu'on puisse employer dans ce but est le dispositif *Siemens et Halske*, qui consiste en une série de tringles J, passant sous la caisse des voitures et qu'on réunit par de petites barres d'accouplement *b* (fig. 670) qui les solidarisent tout en présentant un jeu suffisant pour permettre les mouvements de galop ou de lacet des véhicules; ces tringles actionnent les divers régulateurs. Ce dispositif avait été imaginé par les inventeurs en vue d'un simple réglage par rhéostat [1], mais il va sans dire qu'il s'applique aussi bien à la régulation série-parallèle. Il ne peut être appliqué qu'à des trains de trois ou quatre voitures, car au delà de ce nombre le jeu des barres d'accouplement et l'accroissement de l'effort nécessaire à la manœuvre le rendraient peu pratique.

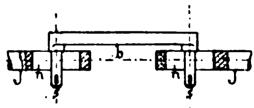


Fig. 670. — Accouplement des tringles de manœuvre des régulateurs Siemens et Halske.

[1] Voir le Brevet allemand n° 85 525, 4 février 1894 : « Regelungsvorrichtung für elektrische Eisenbahnzüge. » Nous reviendrons sur ce système au chapitre XV.

On peut également recourir à des servo-moteurs commandés à distance. Des servo-moteurs électriques, analogues à ceux qu'on emploie pour les ascenseurs ou pour le pointage des projecteurs et d'autres engins, pourraient être appliqués à la manœuvre des arbres des régulateurs. On peut aussi, lorsqu'on dispose déjà d'air comprimé pour le freinage, employer le même agent de transmission pour la régulation.

Un intéressant exemple de cette dernière méthode est fourni par le matériel de la ligne électrique du Fayet à Chamonix, où l'on a adopté un ingénieux système de commande pneumatique dû à M. *Auvert*[1].

Le servo-moteur qui détermine la rotation de l'arbre de chaque régulateur doit pouvoir l'arrêter à la volonté du mécanicien dans les diverses positions qui correspondent aux différentes vitesses en avant ou en arrière. Supposons, par exemple, qu'il y en ait neuf :

0 pour l'arrêt,
1, 2, 3, 4 pour la marche en avant,
1', 2', 3', 4' — arrière.

L'appareil est disposé comme l'indique la figure 671.

Un manchon cylindrique AA', portant en son milieu une collerette saillante EE, est muni à chaque extrémité d'un piston B, B'. Chacun de ces pistons peut se mouvoir dans un cylindre C, C'. Ceux-ci sont respectivement en communication avec des conduites D et D', qui aboutissent chacune à un robinet R, R' disposé d'une manière analogue aux appareils de manœuvre du frein modérable Westinghouse; ces deux robinets R et R' sont placés sur le premier véhicule du train dont font partie les différentes automobiles considérées et permettent d'envoyer, soit dans le cylindre C, soit dans le cylindre C', de l'air comprimé à une pression déterminée variable à volonté.

Autour du cylindre C sont disposés 4 cylindres F, identiques entre eux et dans lesquels se trouvent des pistons G portant des tiges H de 4 longueurs différentes; autour du cylindre C' sont disposés de même 4 cylindres F' et 4 pistons G' semblables aux précédents. Les cylindres F et F' sont tous en communication, par leur extrémité opposée à la tige du piston, les uns avec les autres et avec une conduite leur fournissant de l'air comprimé à une pression sensiblement constante, comprise entre 4 et 5 kg.[2]; l'autre extrémité est en communication avec l'atmosphère. Les pistons G et G' sont donc continuellement pressés par l'air comprimé sur la face opposée à la tige, en sorte que celle-ci tend à sortir. Les longueurs des tiges du premier piston G et du piston G' situé en regard sont d'ailleurs égales et telles qu'elles laissent à fond de course entre leurs extrémités un intervalle égal à l'épaisseur de la collerette EE; les tiges du deuxième piston G et du deuxième piston G' sont aussi

[1] Voir le Brevet français de M. Auvert, 1895.

[2] Dans le cas où les véhicules sont munis du frein automatique Westinghouse, il suffit de relier cette conduite au réservoir auxiliaire de chaque véhicule.

égales et un peu plus courtes que les précédentes; les tiges des pistons G et G′ suivants sont encore plus courtes, et enfin celles des derniers sont les plus courtes de toutes.

Voici maintenant quel est le fonctionnement de l'appareil :

Lorsqu'il n'y a d'air comprimé ni dans le cylindre C, ni dans le cylindre C′, les tiges des premiers pistons G et G′ maintiennent solidement la collerette EE et par suite le manchon AA′ dans leur position moyenne.

Manœuvrons le robinet R et introduisons dans le cylindre C de l'air comprimé à une pression telle que l'effort sur le piston B soit supérieur à l'effort

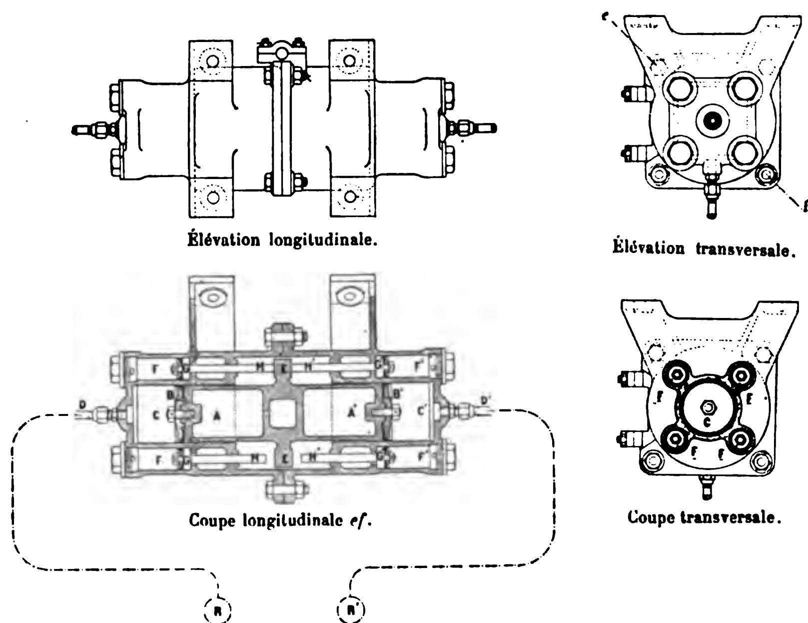


Fig. 671. — Servo-moteur de M. Auvert pour la manœuvre des différents régulateurs d'un train d'automobiles.

sur le piston G′, tout en restant inférieur au double de ce dernier. Le manchon AA′ va se mouvoir et refouler la tige du premier piston G′ jusqu'à ce que la collerette EE vienne buter sur la tige du deuxième. Le manchon AA′ s'arrête alors brusquement et est solidement maintenu dans cette position.

Le même raisonnement montrerait comment on obtient l'arrêt du manchon AA′ dans la seconde, la troisième ou la quatrième position.

En diminuant la pression dans le cylindre C, on ramène le manchon AA successivement dans chacune des positions précédentes. Enfin, si, au lieu de se servir du robinet R, on s'était servi du robinet R′, on aurait placé le manchon AA′ dans les positions 1′, 2′, 3′, 4′, symétriques des positions 1, 2, 3, 4.

En cas de rupture d'attelage, la conduite d'air comprimé se trouvant coupée, les cylindres C et C′ se vident, tandis que les cylindres F et F′ restent pleins d'air, et le servo-moteur se met de lui-même au 0.

En Amérique, MM. *Priest* et *Merrick* ont imaginé plus récemment un appareil à manœuvre pneumatique analogue[1].

Des servo-moteurs électriques très perfectionnés, mais sur lesquels nous n'avons pu encore obtenir de détails[2], ont été imaginés par M. *Sprague* pour le South Side Elevated Ry. de Chicago, où les trains sont également formés



Fig. 672. — Vue d'un commutateur Sprague monté sur une plate-forme d'automobile.

d'un nombre variable d'automobiles indépendantes, équipées chacune avec deux moteurs et dont la marche est réglée individuellement par un régulateur série-parallèle. Les servo-moteurs qui actionnent le cylindre commutateur et le cylindre inverseur des divers régulateurs sont commandés à distance par des commutateurs spéciaux placés sur chaque plate-forme et analogues à ceux des ascenseurs Sprague. Ces commutateurs comportent soit une série de boutons de contact, qu'on presse successivement, soit, comme le montre la figure 672, un certain nombre de plots contenus dans une boite cylindrique et sur lesquels se déplacent des frotteurs mus par une manette amovible; celle-ci permet d'établir des communications entre les différents plots en partant d'une position d'arrêt à laquelle elle est ramenée automatiquement

[1] Voir l'*Éclairage Électrique* du 12 mars 1898, p. 251.

[2] On trouvera seulement quelques indications plus complètes sur ces appareils dans la *Street Railway Review* du 15 décembre 1897, p. 812.

par un ressort dès qu'on la lâche. Les appareils servo-moteurs de toutes les voitures sont reliés électriquement par une intercommunication appropriée et les connexions sont établies de telle sorte qu'on peut régler la marche de toutes les voitures à l'aide d'un quelconque des commutateurs, le même mouvement d'une des manettes produisant toujours le même effet sur les moteurs des voitures accouplées, au démarrage la mise en vitesse est graduée automatiquement; des dispositifs accessoires ramènent les appareils en concordance en cas de dérangement, préviennent les inégalités de charge des moteurs, etc.

Ce système, d'une extrême ingéniosité, fonctionne bien, parait-il, mais il présente, comme on le voit, une assez grande complication.

RÉGULATION DES VOITURES A ACCUMULATEURS

Nous réunissons ici à part quelques exemples des dispositifs adoptés sur les voitures à accumulateurs, afin de permettre d'en constater toute la variété et de les comparer; comme il ne s'agit que d'applications isolées, nous les passerons en revue très rapidement.

Tramways de Berlin (1895). — On connait la méthode du couplage variable de *Reynier* (p. 167), utilisée d'abord par *Julien* sur les tramways de Bruxelles et de New York[1] 1886). Nous allons en donner quelques applications. Le schéma

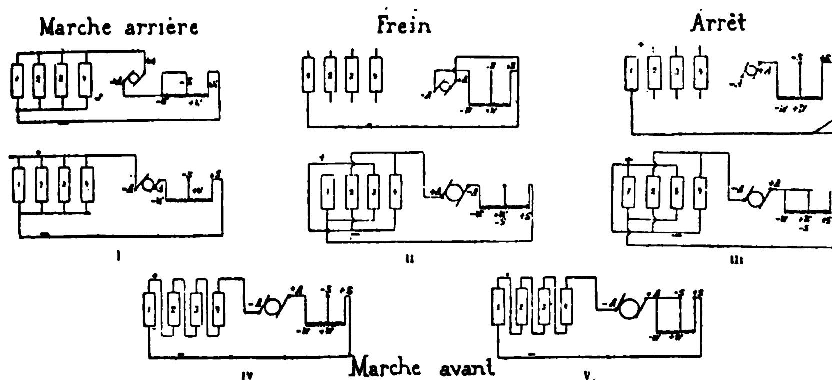


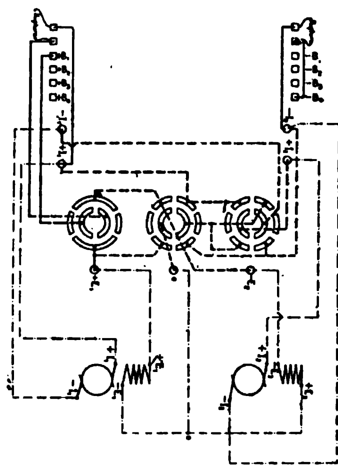
Fig. 673. — Régulation d'une voiture à accumulateurs de Berlin (1895).

de la figure 673 se rapporte à une voiture à accumulateurs Tudor des tramways de Berlin (1895) équipée d'après cette méthode; les combinaisons ordinaires sont complétées ici par une position de freinage et par deux touches de rhéostat qui adoucissent le démarrage.

[1] *Electrical World*, 31 mars et 21 juillet 1888.

D'autres dispositifs ont été essayés aussi plus récemment, notamment par *M. Fischinger* sur une voiture d'essai à 4 essieux qui a circulé à la fin de 1897 sur la ligne de Berlin-Charlottenburg [1].

Tramways de Paris et du département de la Seine. — Le système des 4 batteries a été appliqué sous une forme plus complexe sur le premier type de voiture de la Cie des tramways de Paris et du département de la Seine (lignes de Saint-Denis) (1892) [2], en combinaison avec la méthode série-parallèle. Les quatre batteries, de 27 éléments chacune, ont des bornes séparées $\pm B_1$, $\pm B_2$, $\pm B_3$, $\pm B_4$. Le schéma de la figure 674 indique la disposition des circuits et du régulateur, et la figure 675 le mode de construction de ce dernier. La manœuvre du grand volant opère les divers groupements de batteries à l'aide de palettes qui s'engagent entre des lames de ressorts reliées aux bornes. Le disque supérieur sert à ouvrir et fermer le circuit des moteurs; ses palettes, plus étroites que les autres, sont garnies sur les bords de deux plaques de charbon faciles à remplacer, sur lesquelles éclate l'étincelle de rupture. Des trois autres palettes, l'une permet de passer du couplage en série au couplage en parallèle; elle est enclenchée par un doigt d'arrêt que seul un contrôleur peut ouvrir à la sortie des fortifications; la deuxième donne le moyen de mettre l'un ou l'autre des moteurs hors circuit en cas d'avarie; un enclenchement ne permet de faire cette manœuvre qu'après avoir mis les moteurs en série; la troisième enfin commande l'inversion de marche. Quatre trous ménagés à la partie inférieure de la boite servent à l'arrivée des câbles.

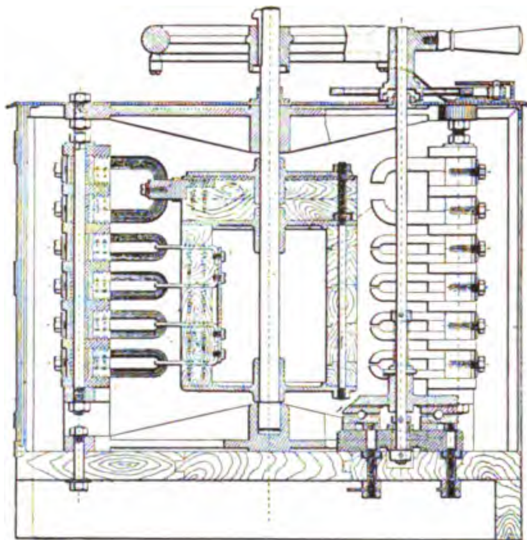

Fig. 674. — Régulation des anciennes voitures à accumulateurs de Paris-Saint-Denis (moteurs en série). — Schéma des circuits.

Dans un type voiture de plus récent (voiture *Bourdon*), la même compagnie a adopté un système tout différent, qui repose sur l'emploi invariable de la batterie complète. Les moteurs, excités en dérivation, sont toujours en parallèle, et le réglage se fait par shunt et rhéostat. Le régulateur plan, placé sous la plate-forme comme le montre la figure 582 (p. 186), comprend (fig. 676) quatre couronnes métalliques sur lesquelles pressent quatre frotteurs reliés deux à deux par des bras en fonte. La couronne extérieure forme deux séries de plots symétriques reliés deux à deux aux divisions du rhéostat de démarrage; la seconde est divisée en deux parties séparées par des plots isolés reliés respectivement aux deux pôles de la batterie. Dans la position représentée, le courant ne passe pas; en tournant le levier dextrorsum, on ferme le circuit sur le rhéostat de démarrage, puis on diminue les résistances; lorsque la

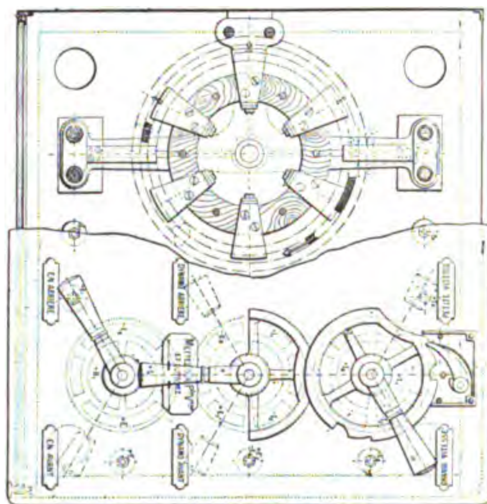
[1] Cf. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 24 mars 1898.

[2] *La Lumière Électrique*, 6 février 1892. — *L'Électricien*, 5 mai 1894.

manette est en A, les moteurs reçoivent le courant directement et la vitesse est de 6 km : h.; en continuant à tourner, on shunte les inducteurs et on



Coupe verticale.



Plan.

Fig. 675. — Régulateur des anciennes voitures à accumulateurs de Paris-Saint-Denis.

augmente la vitesse jusqu'à 12 km : h. à pleine charge. La récupération se produit d'elle-même s'il y a lieu. Les touches à gauche du plot d'arrêt pro-

duisent le freinage en mettant les induits en court-circuit sur des résistances qu'on règle à volonté. Les rhéostats sont logés sous les banquettes. Le mécanicien a sous les yeux un ampèremètre principal et un ampèremètre d'excitation qui paraît peu utile.

Sur les voitures des lignes de Courbevoie et de Levallois, équipées par la Société *Heilmann*, les deux demi-batteries sont couplées invariablement en série et le système de régulation adopté [1] est le même que celui de la maison Kummer pour deux moteurs avec rhéostat liquide et coupleur inverseur, décrit plus haut (p. 254) ; le schéma de la figure 677 suffit donc à le faire connaître.

Le régulateur comprend un coupleur et un commutateur. Le premier permet de marcher avec les moteurs en série ou en parallèle, de freiner électriquement la voiture et de marcher en arrière avec les moteurs en série. Le commu-

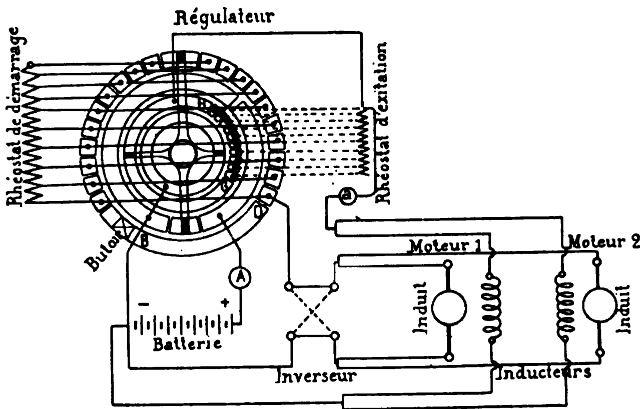


Fig. 676. — Régulation des nouvelles voitures à accumulateurs de Paris-Saint-Denis (moteurs shunt). — Schéma du régulateur et des circuits.

tateur commande les rhéostats liquide et métallique en série, puis le shunt ; la manivelle commande également les freins Lemoine.

L'équipement électrique comprend, en outre, des commutateurs de secours permettant la mise hors circuit de l'un quelconque des moteurs et de l'une quelconque des demi-batteries, un interrupteur sur la plate-forme arrière et enfin deux commutateurs spéciaux servant, en cas d'extinction de l'éclairage, à rallumer les lampes des fanaux avant et arrière.

Entre les deux types de régulation précédents se place le système intermédiaire des deux demi-batteries à couplages variables auquel nous avons donné la préférence (p. 177) ; en voici deux exemples :

Tramway de Madison avenue. — Les voitures à accumulateurs de la ligne de Madison avenue, à New York, ont été munies de régulateurs de construction

[1] Cf. *Bulletin de la Société des Électriciens*, mai 1897.

semblable à celle de tous les régulateurs série-parallèle américains, mais qui combinent ce mode de réglage avec la division de la batterie en deux moitiés séparables. La figure 678 indique les dispositions de l'appareil et la

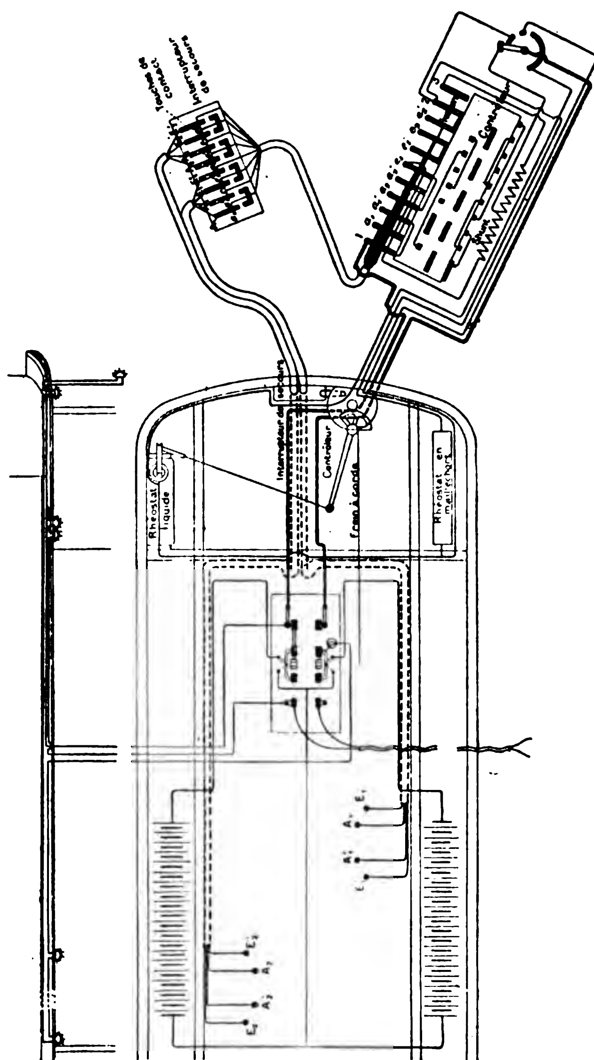


Fig. 677. — Régulation des voitures Heilmann des tramways de Paris et du département de la Seine. Schéma du régulateur et des circuits.

figure 679 les combinaisons réalisées, qui nous paraissent aussi satisfaisantes qu'elles sont simples.

Tramways de Hanovre. — Les automobiles à alimentation mixte des tramways de Hanovre présentent une régulation ingénieuse, imaginée par M. *Clemens*

Adam et particulièrement intéressante à cause de la complexité du problème résolu. Il s'agissait, en effet, de permettre la régulation aussi bien lorsque la voiture est sur la partie suburbaine de la ligne, où l'alimentation est faite par trôlet aérien, que dans la ville, où les accumulateurs l'actionnent seuls; en dehors de la ville, de charger à volonté les accumulateurs à 500 volts et au-dessus, et en

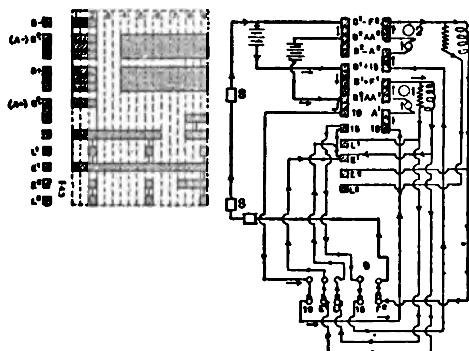


Fig. 678. — Voitures à accumulateurs de Madison avenue (New-York). Schéma du régulateur et des circuits.

ville, au contraire, de mettre la batterie à plus faible voltage pour le démarrage; enfin, de protéger les lampes à incandescence contre les surélévations de voltage qui se produisent pendant la charge des accumulateurs.

M. Adam a satisfait à ces divers desiderata à l'aide d'un système de trois

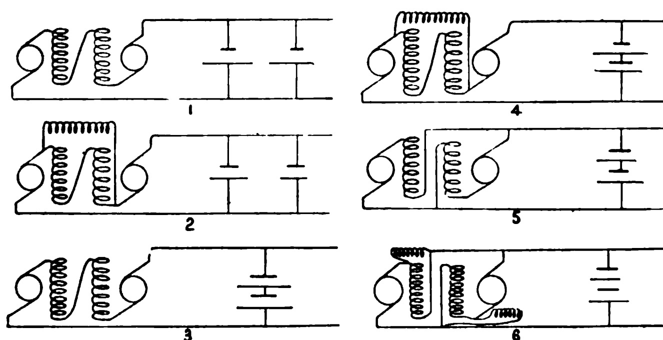


Fig. 679. — Combinaisons réalisées par le régulateur de la figure précédente.

commutateurs, les deux premiers cylindriques et le troisième plan, dont la figure 680 indique la disposition dans le circuit. Les deux cylindres A et B (fig. 681) sont montés sur un arbre commun; A est claveté sur l'arbre, B est fou; A règle l'arrivée du courant au moteur, suivant la méthode de régulation ordinaire du rhéostat en série et produit aussi la marche en arrière dans la position R; B sert à modifier le couplage des deux moitiés de la batterie, qu'il met en série dans les positions 0 et 6 et en parallèle dans les autres; la rupture

du courant entre les positions 5 et 6 est facilitée par l'introduction de deux résistances.

Les cylindres A et B sont solidarisés, comme le montrent les figures 681 et 682, par deux ressorts *h* et *c*, fixés sur la base inférieure du tambour A et terminés par des cliquets qui peuvent entraîner le doigt *a* fixé au cylindre B; celui-ci porte aussi un secteur denté *d*, sur lequel engrène un quart de pignon *e* mobile autour d'un axe fixé sous le cylindre A. Les mêmes figures montrent

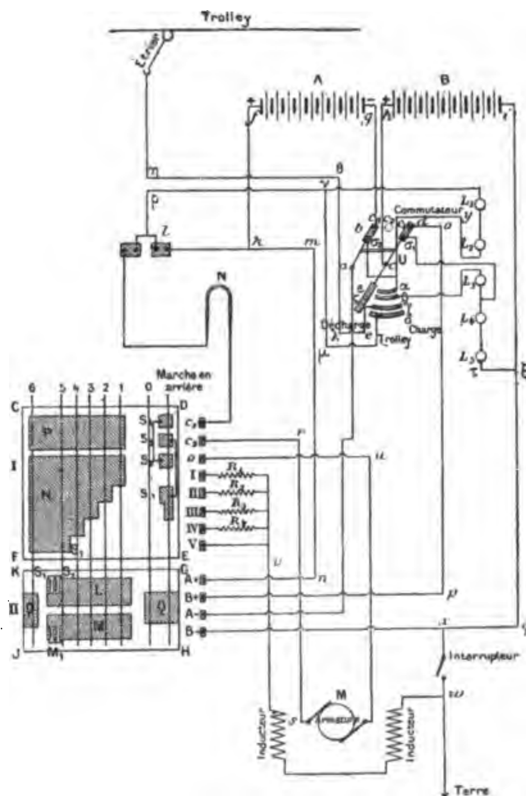


Fig. 680. — Schéma du régulateur et des connexions des voitures de Hanovre.

les effets produits par ces enclenchements : lorsqu'on part de la position 0 en faisant tourner dans le sens sinistrorsum la manette de l'arbre D, le ressort *c* accroche le doigt *a* et le cylindre A entraîne le cylindre B avec lui jusqu'à la position 6, où le tambour B est arrêté par le doigt z^1. Pendant ce déplacement, la vitesse va en croissant constamment, et les demi-batteries, mises d'abord en parallèle, sont en série dans la position 6.

Lorsqu'on veut ralentir, on ramène en arrière la manette du cylindre A; dans ce mouvement, le doigt *g*, qui à la position 6 est en prise avec le crochet d'arrière du quart de pignon *e*, l'entraîne et fait ainsi tourner le tambour B jusqu'à sa position initiale 0, dans laquelle il reste arrêté pendant que le tam-

bour A continue son mouvement rétrograde ; une fois A revenu au zéro, le cliquet *b* vient de nouveau accrocher le doigt *a* et solidariser les deux cylindres.

Quant au commutateur plan à deux manettes U, dont la construction se comprend d'elle-même, il peut prendre trois positions : dans celle de la figure 680, le levier *d* est sur le contact c_1, le levier *b* sur le contact c_3, et le moteur est alimenté par la batterie seule; lorsqu'on amène les manettes à être verticales, la batterie est mise hors circuit et l'alimentation du moteur faite par la ligne seule; enfin, si l'on pousse les manettes à droite, le courant de ligne alimente à la fois les moteurs et la batterie. Dans ces deux dernières positions, les lampes sont mises toutes les cinq en série, tandis que, dans la première,

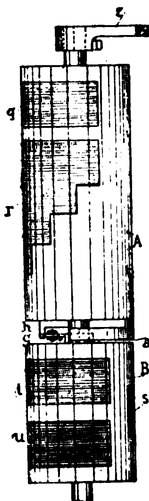


Fig. 681. — Élévation des cylindres du régulateur des voitures de Hanovre.

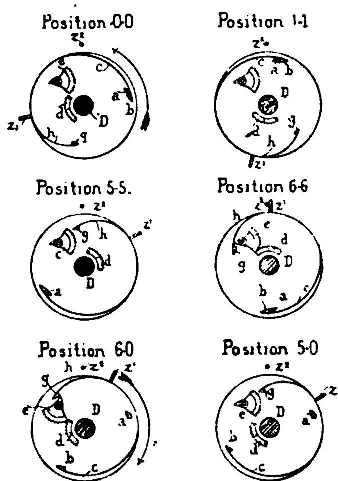


Fig. 682. — Positions successives des cylindres du régulateur des voitures de Hanovre.

elles sont mises par paires en dérivation aux bornes de chaque demi-batterie, la cinquième lampe restant hors circuit.

Ces dispositifs constituent un excellent exemple de régulation bien étudiée dans tous ses détails et couronnée de succès pratique; on pourra s'en inspirer utilement dans des cas analogues.

Tramways de Hagen. — Enfin, bien que nous ayons fait la critique du système à 4 batteries (p. 176), nous donnerons un exemple de régulateur permettant l'emploi de ce système combiné avec une excitation indépendante. La figure 683 représente la régulation établie par les *Ateliers d'Oerlikon* pour les trois voitures des tramways de Hagen qui ont servi aux essais des accumulateurs Waddel Entz (aujourd'hui abandonnés et remplacés par des accumulateurs Tudor, avec moteurs en série).

Nous n'avons figuré qu'un des régulateurs, l'autre étant symétrique et relié en parallèle avec le premier. Sous chacune des deux banquettes était placée une

caisse d'accumulateurs formant trois groupes indépendants ; les deux groupes centraux F,F, de six éléments chacun, étaient montés en série et réservés à l'excitation du moteur unique (puissance, 15 chevaux) ; les quatre autres groupes, de dix-neuf éléments chacun, S_1, S_2, S_3, et S_4, servaient à l'alimentation de l'induit et pouvaient réaliser les trois modes d'accouplement classiques

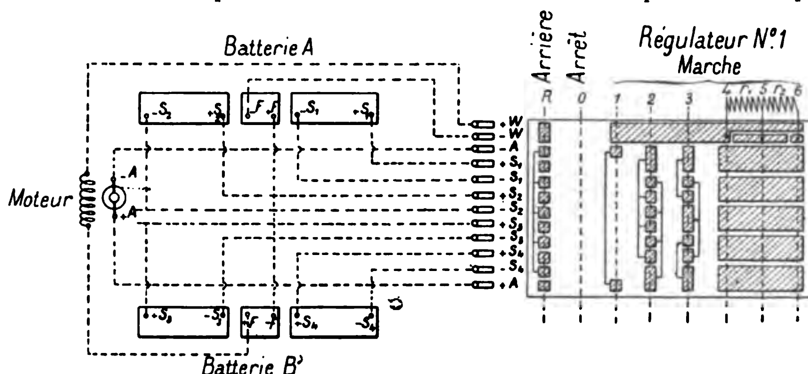


Fig. 683. — Régulation des voitures d'essai à accumulateurs Waddel Entz de Hagen.

Le régulateur cylindrique, à douze frotteurs, présentait huit positions :

1° Repos ; le courant est coupé.

2° Arrêt ; le moteur, fermé en court-circuit, fait frein.

3° Démarrage ; les quatre batteries sont en parallèle.

4° Demi-vitesse ; les batteries sont par groupes de deux.

5° Vitesse normale ; les quatre batteries sont en série.

6° Vitesse accélérée ; même groupement que dans la position 4, mais l'excitation des inducteurs est réduite par la résistance r_1.

7° Vitesse maxima ; l'excitation des inducteurs est réduite au minimum par les résistances $r_1 + r_2$.

R. Marche en arrière à la vitesse de la position 2 ; même groupement des batteries que dans cette position, mais le courant dans l'induit est inversé.

On remarquera que, dans cette régulation, on n'emploie aucune résistance en série avec l'induit, même au démarrage ; il y a là une certaine exagération et il est bon pour adoucir le départ d'employer un rhéostat, comme on l'a fait à Berlin (p. 264).

§ 4. — Régulation a courant constant

Dans ce qui précède, nous avons considéré le seul cas intéressant jusqu'ici pour la traction, celui des moteurs alimentés par un réseau à potentiel constant. Le système d'exploitation qui consisterait à placer toutes les voitures d'une ligne en série sur un

même courant maintenu constant est, en effet, resté à peu près sans applications [1]. Il n'est pas sans intérêt, cependant, de voir comment peut se faire la régulation dans ce système et quels avantages elle peut lui conférer [2].

Méthodes et appareils. — Le courant étant constant, par suite de la régulation automatique des génératrices de l'usine productrice d'énergie électrique, on ne peut agir sur le couple et la vitesse qu'en modifiant le champ magnétique ou le couplage des moteurs.

La modification des ampère-tours excitateurs peut se faire indifféremment par les méthodes du shunt (p. 127), de Sprague (p. 138) ou de la boucle (p. 127); comme le courant ne varie pas, cette dernière est ici parfaitement rationnelle, mais elle reste compliquée, à cause du grand nombre de connexions nécessaires ; la même objection s'adresse à la méthode Sprague, de sorte qu'en définitive la méthode la plus simple et la plus recommandable est celle du shunt.

On peut, de cette façon, réaliser, comme l'a montré la pratique de la Compagnie de l'Industrie Électrique dans des installations fixes, une variation de couple plus étendue qu'avec les moteurs alimentés à potentiel constant et suffisante à la rigueur pour la traction sur des voies à faibles déclivités. Mais, comme il faut se réserver une marge importante pour le couple de démarrage comparé au couple normal, on serait ainsi conduit à l'emploi de moteurs très lourds relativement à la puissance normale et mal utilisés puisque le courant de démarrage resterait égal au courant de régime limité par l'échauffement.

La méthode du couplage variable permet d'obtenir des résultats bien meilleurs : en couplant, en effet, normalement les moteurs en parallèle, ils peuvent être établis pour un courant moitié plus faible que le courant constant de la ligne ; en les mettant en série au moment du démarrage, on doublera le courant qui les traverse, ce qui fera plus que doubler l'effort moteur. On réaliserait des conditions encore plus parfaites avec quatre moteurs par voiture[3].

En combinant l'emploi de ces couplages avec celui de shunts variables, on pourrait, en définitive, régler la marche des moteurs à courant constant aussi aisément qu'on le fait actuellement pour les moteurs en série alimentés à potentiel constant et en employant au besoin les mêmes moteurs.

Les régulateurs série-parallèle actuels resteraient applicables, moyennant trois légers changements :

Suppression des rhéostats en série, qui n'auraient plus de raison d'être ;

[1] Exception faite pour les quelques installations de « telpherage » mentionnées plus haut.

[2] Nous rappellerons que toutes les voitures étant alimentées en série, il faut deux prises de courant; le montage des circuits devrait donc être légèrement modifié et analogue à celui des voitures à double trôlet actuelles. Cf. A. Blondel : « Long distance distribution for electric traction », *Electrical World*, 1er janvier 1898.

[3] On remarquera que, le courant restant constant, c'est le voltage consommé par chaque voiture ou train qui varie avec la dépense d'énergie. Si les moteurs prennent 500 volts à la vitesse normale, la différence de potentiel utilisée deviendra 1 000 volts lorsqu'on les mettra en série et tombera à zéro lorsqu'on arrêtera la voiture ; à chaque couplage, elle variera avec la vitesse réalisée.

Addition de touches plus nombreuses aux shunts pour la variation du champ;

Enfin réalisation de l'arrêt non par rupture du circuit, mais au contraire par mise en court-circuit complète des moteurs et du régulateur de façon à livrer un libre passage au courant, qui doit continuer à circuler dans les autres voitures.

L'introduction de ces modifications dans les régulateurs existants ne présente aucune difficulté et il est inutile d'y insister.

Avantages de ce mode de régulation. — Ce mode de régulation présente, comme on le voit, deux avantages intéressants par rapport aux systèmes actuels :

1° L'arrêt se faisant par mise en court-circuit, de même que les changements de couplage, aucune étincelle de rupture n'est à craindre et la principale difficulté de construction et d'entretien des régulateurs disparait;

2° Cette régulation n'exigeant l'emploi d'aucun rhéostat en série, même au démarrage, et les shunts eux-mêmes (qui consomment peu) pouvant être supprimés par la méthode de Sprague ou de la boucle, la consommation d'énergie est réduite au minimum et toute perte inutile est évitée.

Les pertes au démarrage dans les systèmes actuels étant un des éléments capitaux de la dépense d'énergie dans les réseaux urbains, comme on le verra au chap. XIII, il y aurait un réel intérêt à ce point de vue à employer la distribution à intensité constante, en admettant qu'on arrive à la rendre pratique; cela ne paraît guère probable pour les réseaux de tramways, mais les chemins de fer et particulièrement les chemins de fer métropolitains pourraient peut-être en tirer dans certains cas un utile parti.

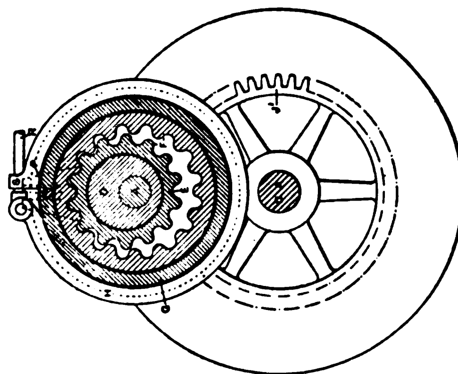
§ 5. — Systèmes divers proposés comme auxiliaires de la régulation de vitesse

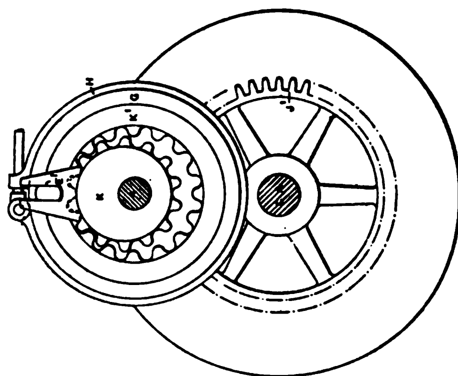
Transmissions à réduction variable. — Au lieu d'agir sur la vitesse du moteur lui-même, comme c'est nécessaire avec les systèmes de transmission décrits ci-dessus, quelques ingénieurs ont proposé, à diverses reprises, de renverser le problème, en maintenant le moteur à une allure fixe (ce réglage se produit automatiquement, par exemple, si l'on emploie un moteur à excitation constante) et faisant varier le rapport de transformation suivant la vitesse à réaliser par la voiture. Cette méthode permettrait de simplifier beaucoup les dispositifs électriques et éviterait de perdre de l'énergie dans des rhéostats aux faibles vitesses et aux démarrages; elle donnerait d'ailleurs pour ces derniers la solution la plus rationnelle en permettant de démarrer sans dépen-

ser sensiblement plus de puissance qu'en marche normale (à moins qu'on ne désire une accélération très rapide).

La première idée qui se présente, c'est de recourir aux mécanismes de changement de vitesse par contre-arbre, employés sur les tours et sur un grand nombre de machines-outils ; de nombreux inventeurs[1] ont proposé ou essayé ce système, dont la voiture électrique de Henry (t. I, p. 15) offre l'un des plus anciens exemples.

Malheureusement, la réalisation pratique d'un semblable procédé présente de grandes difficultés mécaniques, qui ne permettent pas de faire varier la vitesse dans de grandes limites, en sorte qu'on ne peut guère songer à obtenir plus de deux allures différentes. Le procédé qui vient le plus naturellement à l'esprit, c'est de disposer côte à côte deux trains d'engrenages


Coupe transversale.


Élévation.

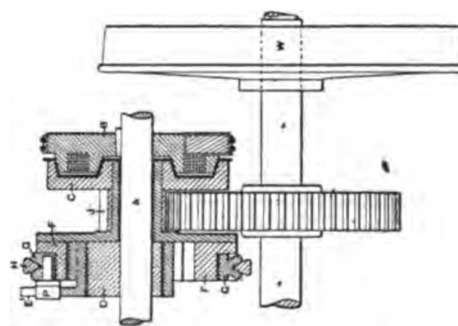

Coupe longitudinale.

Fig. 684. — Transmission à deux vitesses de M. Worby-Beaumont pour moteur à simple réduction.

[1] Voir, par exemple, la *Lumière Électrique*, 11 mars 1893, p. 467 (Allington, etc.).

ayant des rapports de transmission différents et de mettre en prise à volonté tantôt l'un, tantôt l'autre, à l'aide d'embrayages à friction ordinaires ou d'embrayages magnétiques. Ce dispositif a été expérimenté par divers inventeurs, notamment par M. *Goss* en Amérique et plus récemment par la Compagnie Westinghouse. Il présenterait une certaine utilité sur les locomotives à crémaillère, comme on l'a vu au chapitre VIII; mais il est difficile de trouver la place nécessaire pour loger, soit sur l'arbre du moteur, soit sur l'essieu, deux roues et deux embrayages.

Il en est de même des transmissions différentielles par cordes ou par engrenages (système White) proposées par divers auteurs, notamment par *Edison*[1], et des transmissions par courroies sur poulies coniques à axes parallèles et angles opposés prônées par d'autres inventeurs, tels que *Egger* et *Wossel*[2].

On peut réaliser deux vitesses à l'aide d'engrenages épicycloïdaux convenablement agencés. Le plus connu de ces dispositifs est le système de M. *Worby-Beaumont*, employé en Angleterre par la Gas Traction Co. sur ses tramways à gaz du système Lührig et dont l'inventeur a proposé l'application aux tramways électriques.

L'appareil, représenté par la figure 684, se compose d'une roue principale F, dentée intérieurement et fixée invariablement sur un double plateau circulaire C, fou sur l'arbre du moteur et portant le pignon J qui commande la roue dentée de l'essieu J^1. Autour de cette roue peut tourner un anneau G, qui peut, d'autre part, être immobilisé par le frein à ruban H qu'on serre à volonté par le levier R. A l'intérieur de la roue principale F se trouve une roue dentée satellite E, folle sur un excentrique D calé sur l'arbre du moteur; à cette roue E est fixée une fourchette E^1 embrassant un goujon P vissé dans l'anneau G. Enfin, sur l'arbre A est encore calé un embrayage B mécanique ou magnétique comme le suppose la figure.

Le fonctionnement de l'appareil s'explique de lui-même : à l'arrêt, on desserre le frein et l'embrayage, et le moteur peut tourner à vide en entraînant seulement l'excentrique D et l'embrayage B, sans actionner l'essieu. Si l'on serre le frein par le levier R, l'anneau G et par suite la broche P sont immobilisés, et la roue E entraîne la roue F comme une sorte de manivelle, avec une vitesse assez faible qui dépend du rapport des diamètres de F et de l'excentrique ; le pignon J est aussi mis en mouvement. Enfin, on peut réaliser une vitesse plus grande en desserrant le frein et faisant, d'autre part, fonc-

[1] *Lumière Électrique*, 18 avril 1891, p. 71, et 8 août 1891, p. 268.

[2] Brevet allemand n° 80448, 27 août 1893.

tionner l'embrayage B; le pignon J devient alors directement solidaire de l'arbre moteur.

Le même ingénieur a proposé un appareil analogue applicable aux moteurs sans réduction de vitesse. L'arbre du moteur serait creux et envelopperait l'essieu; il porterait un pignon actionnant la première roue d'un train épicycloïdal extérieur formé de deux roues solidaires, folles sur un petit arbre auxiliaire et pouvant être immobilisées par un embrayage magnétique; la seconde roue actionnerait à son tour une roue calée sur l'essieu. Suivant qu'on mettrait en prise ou non l'embrayage, l'essieu se trouverait solidarisé avec l'arbre du moteur ou actionné seulement par le train épicycloïdal [1].

Ces ingénieux dispositifs sont malheureusement compliqués et dispendieux, et leur dérangement compromettrait la marche des voitures qui en seraient munies. Ils n'ont d'ailleurs plus guère de raison d'être aujourd'hui, où l'on peut obtenir deux régimes de vitesse principaux par l'emploi de deux moteurs ou même d'un seul moteur à deux induits [2]. L'idée qui les inspire n'en est pas moins intéressante, et on en a vu une application sous une forme très différente dans la méthode de M. Ward Leonard, où, au lieu de modifier le rapport de transformation des mouvements de l'arbre moteur et de l'essieu, on considère l'ensemble même de la génératrice et du moteur comme une simple transmission de mouvement et l'on fait porter la modification sur cette transmission. Cette analogie est particulièrement nette quand la génératrice est placée sur la voiture elle-même, comme c'est le cas dans la locomotive Heilmann : l'ensemble de la génératrice, des câbles conducteurs et du moteur remplace alors simplement une transmission mécanique entre l'arbre moteur de la machine à vapeur et l'essieu.

Emploi d'embrayages associés à des moteurs tournant constamment. — On a proposé d'améliorer les conditions du démarrage, suivant un procédé analogue, en disposant un embrayage entre les engrenages et l'arbre moteur ou l'essieu. A l'arrêt, on desserrerait l'embrayage et on laisserait le moteur tourner à vide à grande

[1] Cf. *Proc. Inst. of Civ. Eng.*, vol. CXII, p. 62.

[2] D'autres inventeurs ont proposé de laisser les inducteurs fous sur l'arbre du moteur pour leur permettre de prendre un mouvement inverse de celui de l'armature; en modifiant la vitesse de ce mouvement, on pourrait régler celle de la voiture tout en maintenant une vitesse de rotation relative constante entre les deux parties du moteur. Mais comme la vitesse de rotation des inducteurs ne pourrait être réglée que par un frein, cette disposition serait simplement absurde : même à l'arrêt de la voiture, il n'y aurait aucun intérêt à faire tourner les inducteurs.

vitesse[1]. Au démarrage, on mettrait au contraire l'embrayage en prise : la force vive accumulée serait plus que suffisante pour mettre la voiture en mouvement, et l'on attendrait ce départ pour envoyer le courant dans le moteur; il suffirait ainsi d'une intensité beaucoup plus faible, proportionnée simplement à l'accélération demandée et non aux résistances au départ.

On pourrait, du reste, adoucir la mise en prise de l'embrayage en intercalant dans la transmission des ressorts puissants, qui pourraient servir en même temps à emmagasiner l'énergie dépensée à l'arrêt.

On a proposé des dispositifs variés pour appliquer cette idée. Le meilleur consisterait à placer un petit embrayage magnétique (fig. 685) entre l'arbre du

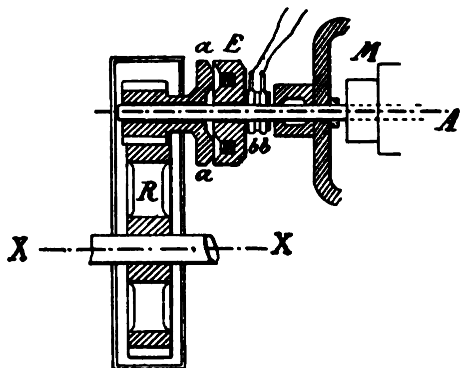


Fig. 685. — Emploi d'un embrayage magnétique sur l'arbre moteur.

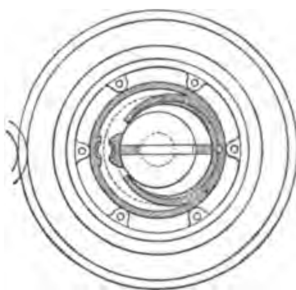


Fig. 686. — Embrayage hydraulique Wenstrom.

moteur et le pignon monté fou sur cet arbre ; l'appareil ainsi placé aurait, en effet, des dimensions beaucoup plus faibles que si on le mettait sur l'essieu, le couple à transmettre étant moindre, et permettrait d'immobiliser les engrenages pendant les arrêts de la voiture, ce qui leur éviterait une fatigue inutile et supprimerait le bruit qu'ils produisent[2]. Le bruit du moteur pendant les arrêts serait très faible et n'aurait rien de comparable à celui des moteurs de tramways à gaz.

Wenstrom avait imaginé, dès 1891, un système d'embrayage hydraulique

[1] Accessoirement, cette méthode épargnerait aux engrenages la fatigue excessive à laquelle ils se trouvent soumis aujourd'hui, par l'effet de la force vive de l'armature, lorsqu'on cale les roues brusquement par les freins.

[2] L'enroulement de l'embrayage devrait être préservé de l'huile et de l'humidité par une garniture métallique étanche ; l'arbre creux du pignon serait suffisamment lubrifié par quelques trous radiaux percés dans le pignon.

simple et peu encombrant, qui a eu quelques applications et mérite d'être signalé. Cet appareil, qui se plaçait sur le pignon du moteur, consiste, comme le montre en coupe la figure 686, en une boîte embrassant l'arbre moteur et portant un second cylindre excentré par rapport à cet arbre; la base de cette boîte est formée par la surface du pignon et le couvercle se compose d'un disque qui la ferme hermétiquement. L'arbre est muni d'une rainure dans laquelle coulisse une réglette et le tout est complètement rempli d'huile. Cet ensemble constitue une pompe rotative, dans laquelle la circulation de l'huile est possible tant qu'on laisse débouchée l'ouverture ménagée à gauche du dessin; c'est ce qu'on fait pendant l'arrêt de la voiture, et le moteur peut ainsi tourner à sa vitesse normale; pour mettre en marche, il suffit de fermer cette ouverture : l'huile ne trouvant plus de passage, le pignon devient solidaire de l'arbre et est entraîné avec lui.

Tous ces systèmes présentent deux inconvénients pratiques : ils compliquent l'équipement et augmentent les chances d'avarie des voitures, qui sont à la merci du bon fonctionnement de l'embrayage; ils réduisent, en outre, l'espace déjà trop faible dont on dispose pour loger le moteur entre les roues. Ces inconvénients sont hors de proportion avec l'avantage à obtenir; la force de démarrage est du reste une qualité trop précieuse des moteurs électriques pour qu'on renonce volontiers à la faire valoir.

Aussi, bien que divers essais en aient été faits en Amérique, ces méthodes n'ont jamais pu jusqu'ici entrer dans la pratique.

CHAPITRE XI

FONCTIONNEMENT ET RÉGULATION DES MOTEURS DE TRACTION A COURANTS ALTERNATIFS

Objet de ce chapitre. — Comme on l'a vu au chapitre V, les seuls moteurs à courants alternatifs dont on ait jusqu'ici tiré un parti pratique pour la traction sont les moteurs polyphasés, à champs tournants, dont nous avons suffisamment indiqué le mode de construction (t. I, p. 239) ; ce sont donc les seuls dont nous nous occuperons ici avec détails. Les figures 687 et 688 montrent

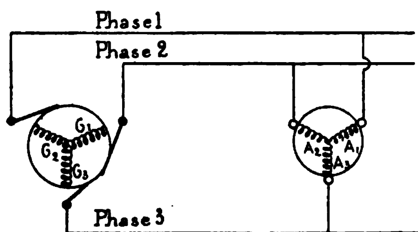


Fig. 687. — Schéma du mode d'alimentation d'un moteur de traction triphasé.

G_1, G_2, G_3, circuits de la génératrice donnant des courants alternatifs égaux, mais décalés de 120°.

A_1, A_2, A_3, circuits correspondants dans l'inducteur du moteur.

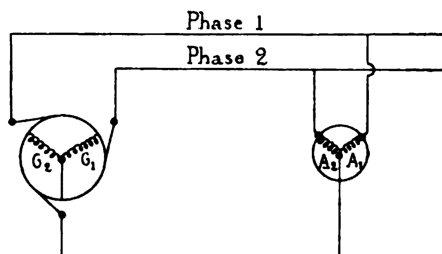


Fig. 688. — Schéma du mode d'alimentation d'un moteur de traction diphasé.

schématiquement la façon dont ils reçoivent en général le courant, au moyen de deux lignes aériennes et d'un retour constitué par les rails.

Le but du présent chapitre est de faire connaître le fonctionnement de ces moteurs au point de vue de la traction électrique. Dans tout ce qui suit, nous supposerons connues les propriétés élémentaires des courants alternatifs et leurs méthodes de calcul graphique.

§ 1. — Fonctionnement normal

Champs magnétiques tournants. — Il nous paraît utile de rappeler d'abord sommairement le mécanisme de la production des champs tournants dans les moteurs à courants polyphasés.

L'idée féconde des champs tournants est due à *Galileo Ferraris*, qui y avait été conduit par les analogies des courants alternatifs et des vibrations lumineuses : il produisit, à l'aide de deux systèmes de bobines à angle droit, parcourues par deux courants alternatifs diphasés d'un quart de période, deux champs magnétiques rectangulaires diphasés de même, dont la composition donnait comme résultante un champ constant tournant d'une manière continue ; en faisant entraîner par ce champ une cage en cuivre fermée en court-circuit, il inventa le premier moteur à champ tournant.

Tesla, Bradley, Wenstrom, von Dolivo Dobrovolsky construisirent ensuite d'après cette idée les moteurs à champ tournant industriels, auxquels ils apportèrent des perfectionnements successifs. Les moteurs actuels ne rappellent plus que de loin celui de Ferraris et leur principe gagne à être exposé d'une façon différente [1].

Considérons un moteur multipolaire construit à la façon ordinaire, c'est-à-dire formé de deux cylindres concentriques, séparés par un très petit entrefer et portant tous deux dans des encoches des enroulements en fils de cuivre isolé. Le phénomène essentiel du fonctionnement de ce moteur est la production par les enroulements primaires, c'est-à-dire parcourus par les courants polyphasés d'alimentation, d'un certain nombre de champs magnétiques inducteurs tournants. Cette production se conçoit aisément si l'on suppose qu'on emploie, au lieu d'un nombre limité d'encoches et de courants dans chaque pôle inducteur, une infinité de courants alternatifs polyphasés sinusoïdaux [2] circulant dans autant de fils très rapprochés et dont la phase varie insensiblement de l'un à l'autre. La figure 689 représente schématiquement ce moteur idéal.

Les courants dans les divers fils à un certain instant seront, par hypothèse, en appelant ε leur petite différence de phases :

dans le 1er fil, $I_0 \sin 2\pi \frac{t}{T}$,

— 2e fil, $I_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} + \varepsilon\right)$,

— 3e fil, $I_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} + 2\varepsilon\right)$.

On aura donc le long de l'entrefer une répartition sinusoïdale et régulièrement

[1] Cf. A. Blondel, Propriétés générales des champs magnétiques tournants, *Éclairage Électrique*, 1895.

[2] C'est-à-dire variant en fonction du temps suivant la loi harmonique

$$i = I_0 \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

alternative des intensités de courant ; la distance entre deux maxima opposés successifs donne la largeur d'un pôle ; l'ensemble des deux fils les plus voisins parcourus par deux courants égaux, mais inverses, constitue une bobine plate produisant un flux magnétique dans la direction normale à son plan. Il s'établira, par suite, dans l'entrefer une série de flux alternativement positifs et négatifs, dont les lignes de force suivront les directions indiquées par les flèches et dont la densité, maxima au milieu des pôles tournants, variera aussi suivant une loi sensiblement sinusoïdale. Un pôle est constitué par la portion de cylindre d'où s'échappent des lignes de force de même direction. Deux pôles constituent un champ tournant complet.

La figure 689 représente l'état des choses à un moment donné t; mais à

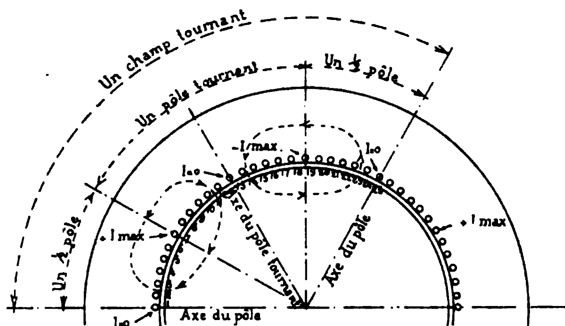


Fig. 689. — Principe de la production des champs magnétiques tournants dans un moteur polyphasé multipolaire.

l'instant $t + \varepsilon$, le courant deviendra nul dans le fil situé immédiatement à gauche de celui marqué 0 sur la figure ; à l'instant $t + 2\varepsilon$, ce sera dans le deuxième fil à gauche, et ainsi de suite ; à chacun de ces instants, la distribution des courants représentée sur la figure se reproduit semblable à elle-même, mais décalée d'un certain angle. Les flux magnétiques restent donc semblables à eux-mêmes, mais tournent vers la gauche ; dans la durée d'une période T, ils avancent d'un espace égal à la largeur de deux flux ou d'un champ ; ils tournent, par suite, dans le sens sinistrorsum avec la vitesse de $\frac{1}{pT}$ tours par seconde, en appelant $2p$ le nombre de pôles inducteurs[1].

Les champs tournants ainsi définis sont des champs parfaits, parce qu'ils restent toujours identiques à eux-mêmes et tournent avec une vitesse constante. Mais, en pratique, par raison de simplicité, ils ne peuvent être obtenus qu'à l'aide de trois ou six courants par champ (courants triphasés) ou de deux ou quatre courants par champ (courants diphasés)[2]. De plus, les fils, au lieu d'être répartis uniformément, doivent être logés par paquets dans des encoches ou perforations placées près de l'entrefer. Il en résulte que les champs tour-

[1] On a vu plus haut (t. I, p. 225) comment il convient de choisir ce nombre de pôles.

[2] Nous comptons ici les fils situés près de l'entrefer ; ceux dans lesquels les phases sont exactement opposées deux à deux sont alimentés à l'aide d'un même courant, circulant en sens opposés ; c'est pourquoi il suffit de 2 ou 3 courants pour 4 ou 6 fils périphériques.

nent d'une façon moins régulière et se déforment un peu en tournant ; mais le principe de leur production et leurs propriétés générales restent les mêmes.

Principe du fonctionnement d'un moteur à champs tournants. — Une fois admise la production de champs tournants sensiblement uniformes par l'effet des courants polyphasés inducteurs, il est facile de comprendre leur action sur les enroulements du cylindre secondaire ou induit.

Supposons que l'on fasse tourner l'induit par une commande extérieure (par exemple, en laissant la voiture descendre une pente) à une vitesse égale à celle des flux tournants inducteurs, soit à un nombre de tours n_0 par seconde ; les conducteurs secondaires, se déplaçant aussi vite que le champ, ne seront le siège d'aucune force électromotrice et par suite d'aucun courant. Mais aussitôt que la vitesse de l'induit se ralentira et tombera, par exemple, à une vitesse $n < n_0$, les conducteurs induits seront coupés par les lignes de force des champs inducteurs avec une vitesse relative $(n_0 - n)$ et deviendront, en vertu de la loi de l'induction rappelée plus haut (p. 67), le siège de forces électromotrices proportionnelles à $(n_0 - n)$ et aux flux inducteurs. Si les résistances des circuits induits sont constantes, les courants induits varieront proportionnellement aux mêmes quantités.

On conçoit donc que le couple moteur ira en augmentant quand le moteur se ralentira. Cet accroissement est, en général, si rapide que la vitesse ne varie que de quelques tours (3 à 5 p. 100 de sa valeur normale) entre la marche à vide et la pleine charge.

Les courants inducteurs croissent automatiquement avec la charge, à peu près proportionnellement aux courants induits. Ceux-ci exercent, en effet, sur l'inducteur une réaction absolument analogue à celle qui se produit dans les transformateurs. A vide, les courants inducteurs sont limités par la self-induction des circuits de l'inducteur et se réduisent à leur composante magnétisante ; en charge, les courants induits, qui sont sensiblement opposés aux courants inducteurs, réduisent cette self-induction d'autant plus qu'ils sont plus intenses et font apparaître des courants inducteurs équivalents [1].

[1] Nous rappelons en passant que chacun des courants inducteurs alternatifs à un

On donne le nom de glissement g au rapport de la différence des vitesses $(n_0 - n)$ à la vitesse n_0 obtenue dans le cas du synchronisme [1],

$$g = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{n}{n_0}. \tag{59}$$

En pratique, g doit être aussi faible que possible, même à pleine charge, parce que le rendement varie en raison inverse de ce glissement, comme il est facile de le voir [2]. L'induit tourne, en effet, avec la vitesse n, tandis que les courants induits tournent dans l'espace avec la même vitesse n_0 que les champs qui les produisent; or la puissance produite par les forces que les champs exercent sur les courants induits est égale au produit du couple moteur électromagnétique par la vitesse angulaire, c'est-à-dire

$$2\pi n_0 \, C,$$

et la puissance mécanique recueillie sur l'arbre est le produit de la vitesse de l'induit par le même couple

$$2\pi n \, C.$$

Il existe donc, par le fait même du glissement, une perte relative d'énergie

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = g.$$

Cette perte est analogue, comme on le voit, à celle que produit dans une transmission le glissement d'une courroie sur sa poulie, cas où le travail perdu est transformé en chaleur par frottement;

régime quelconque peut se décomposer comme une force en deux composantes : l'une de même phase que la force électromotrice et qui est un courant de travail ou *watté*, l'autre décalée de 1/4 de période ou de $\frac{\pi}{2}$, qui est un courant ne consommant pas de travail ou courant *déwatté*. Dans les moteurs polyphasés, le courant déwatté va en croissant d'une manière continue et importante avec la charge.

[1] Si l'on pose $\Omega = \frac{2\pi}{T}$, en appelant encore T la durée en secondes d'une période des courants inducteurs, et $\frac{n}{n_0} \frac{\pi}{T} = \omega$, on peut écrire également

$$g = \frac{\Omega - \omega}{\Omega}.$$

[2] Cette remarque capitale a été faite pour la première fois par MM. Leblanc et Hutin à une époque où l'on connaissait encore fort peu ces moteurs. Cf. *Lumière Électrique*, 1891.

ici, il est transformé en chaleur par effet Joule dans les conducteurs de l'induit, ce qui n'est en dernière analyse qu'un frottement moléculaire.

Pour avoir un bon rendement, il faut que le glissement reste très faible ; en pratique, il ne dépasse pas 4 à 5 p. 100 tant qu'on n'introduit pas de résistances dans les circuits secondaires, comme cela est nécessaire pour produire des variations de vitesse ; ces résistances entraînent des pertes d'énergie plus ou moins importantes.

Analogies et différences entre les moteurs à courants polyphasés et les moteurs à courant continu; courbes caractéristiques. — D'après ce qui précède, le fonctionnement des moteurs polyphasés est caractérisé par les particularités suivantes :

1° L'excitation des inducteurs, c'est-à-dire la production des champs magnétiques, est faite par des courants *alternatifs*, qui fournissent en même temps, par leur réaction sur les courants induits, l'énergie nécessaire à la production du travail mécanique [1] ; l'induit est sans communication avec le réseau, et les courants qui le parcourent sont créés seulement par induction : d'où la nécessité d'employer de faibles entrefers entre les deux cylindres. Au contraire, dans les moteurs à courant continu, les deux fonctions sont bien distinctes : le circuit inducteur ne fournit que le champ magnétique, tandis que le circuit induit, alimenté directement par la ligne, fournit l'énergie nécessaire à la production du travail mécanique.

2° L'induit ne porte pas de collecteur : sa réaction n'est donc pas limitée comme pour le courant continu par la production d'étincelles aux balais ; cela permet de mettre des enroulements plus considérables sur l'induit et d'employer de très petits entrefers qui réduisent les enroulements d'excitation, deux conditions favorables à la réalisation de grandes puissances sous un faible poids.

3° L'induit ne peut prendre une vitesse supérieure à celle du synchronisme, où il ne produit plus aucun couple ; le couple moteur n'apparaît sur l'arbre qu'à condition qu'il y ait un cer-

[1] Voir la note de la page 283.

tain ralentissement ou glissement et croît avec ce glissement.

Le fonctionnement des moteurs polyphasés présente à ce dernier point de vue une analogie intéressante avec celui d'un moteur à courant continu alimenté à potentiel constant et à excitation constante. Nous avons rappelé, en effet, au chapitre IX (p. 77) que, si l'armature atteint une vitesse n_0 telle que la force électromotrice de l'induit soit égale au potentiel de distribution, il n'y passe aucun courant, et qu'au contraire, aussitôt qu'elle se ralentit, il y a passage dans l'induit d'un courant proportionnel à la réduction de vitesse $(n_0 - n)$ et donnant naissance à un couple proportionnel à la même différence, c'est-à-dire, en appelant β et γ des constantes, r la résistance de l'induit, N son nombre de spires et Φ le flux tournant,

$$C = \beta N \Phi I = \frac{\gamma N \Phi^2 (n_0 - n)}{r}. \qquad (60)$$

Dans les deux cas, si la vitesse n dépasse la limite n_0, le moteur devient générateur et fait l'office de frein à récupération rendant de l'énergie au réseau au lieu d'en emprunter.

Mais il ne faut pas pousser l'analogie plus loin, car, si, dans le moteur à courant continu à excitation constante considéré, le flux reste constant à travers l'induit, il est loin d'en être de même pour le moteur polyphasé, par suite des *fuites magnétiques ;* une partie des lignes de force produites par les enroulements inducteurs se ferme en effet directement à travers l'air sans passer par le noyau induit et ces fuites magnétiques croissent avec la réaction d'induit. D'autres fuites se produisent de même dans l'induit, c'est-à-dire que les enroulements de celui-ci donnent naissance dans l'air environnant à des lignes de force qui se ferment sans traverser l'inducteur. Ces deux espèces de fuites donnent aux deux enroulements de la *self-induction*, qui réduit les intensités de leurs courants et établit entre les courants inducteurs et les courants induits une *différence de phases* ou décalage réduisant leur réaction réciproque. Tant que la différence de phases entre les courants induits et les flux inducteurs est négligeable, ces deux facteurs varient à chaque instant proportionnellement et le couple produit est de la forme

$$\frac{A \Phi I}{r},$$

comme pour le courant continu, en appelant Φ et I les valeurs moyennes des flux et des courants, r la résistance des circuits induits et A une constante ; au contraire, s'il y a un décalage θ, l'expression moyenne du produit précédent prend la forme connue

$$\frac{A\Phi I}{r}\cos\theta.$$

Par suite de ces effets, en apparence accessoires, mais en réalité fort importants, le couple d'un moteur polyphasé croît bien d'abord

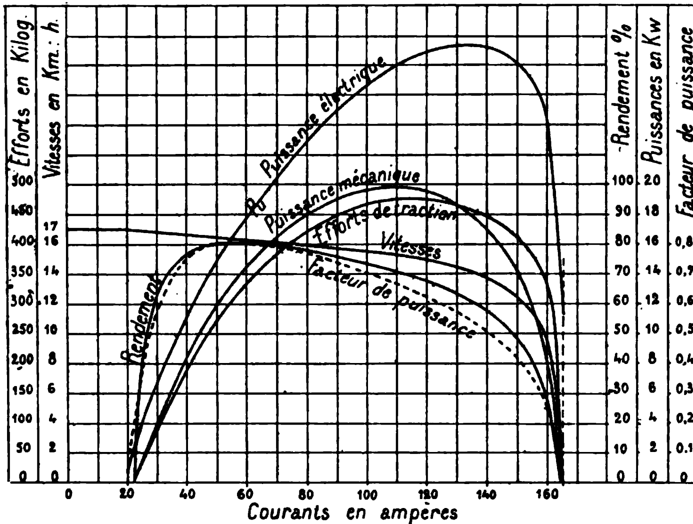


Fig. 690. — Courbes caractéristiques à la jante des roues d'un moteur triphasé à 220 volts polygonaux en fonction du courant dans l'une des trois branches de l'inducteur.

proportionnellement à $(n_0 - n)$, mais n'augmente ensuite que plus lentement avec la charge et atteint bientôt un maximum au delà duquel il décroît vers zéro ou une très faible valeur au démarrage.

On jugera bien de cette forme de la courbe du couple par la figure 690, qui représente les caractéristiques en *fonction du courant* d'un moteur triphasé de 15-25 chevaux adapté à la traction d'une automobile de tramway. Les abscisses indiquent les valeurs du courant dans l'un des trois circuits de l'enroulement inducteur à la tension d'alimentation de 220 volts polygonaux (entre fils) correspondant à 127 volts étoilés (entre chaque fil et le point neutre) ; les ordonnées représentent les efforts mesurés en

kilogrammes à la jante des roues, déduction faite des pertes dans les engrenages. On voit que le couple atteint son maximum pour 120 ampères.

La même épure indique les variations de la vitesse, de la puissance mécanique P_m, produit de l'effort par la vitesse, et de la puissance électrique consommée aux bornes P_e. Celle-ci n'est pas, comme pour un moteur à courant continu, égale simplement au produit de la tension aux bornes par l'intensité du courant; elle n'en est qu'une fraction variable avec la charge; le rapport $\frac{P_m}{3EI}$ constitue ce qu'on appelle le facteur de puissance; nous en avons indiqué également sur l'épure les variations en fonction du courant.

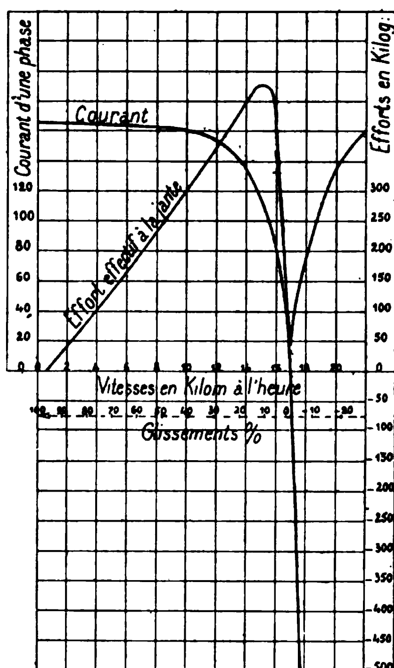


Fig. 691. — Courbes de fonctionnement du moteur de la figure précédente en fonction de la vitesse ou du glissement. A gauche du glissement zéro, régimes normaux; à droite, régimes de récupération, correspondant à la marche du moteur comme génératrice sous l'action de la pesanteur.

De même que pour le moteur à courant continu, on peut rapporter ces courbes aux *vitesses* ou, ce qui revient au même, aux *glissements*, mesurés par rapport à la vitesse de synchronisme, comme on l'a vu plus haut. La figure 691 représente, par exemple, sous forme graphique les lois caractéristiques de variation du courant et du couple avec la vitesse pour le même moteur triphasé avec et sans résistances supplémentaires dans l'induit [1]. On voit que le courant devient à peu près constant au-dessous d'une certaine vitesse et que le couple s'annule au démarrage [2]

[1] Nous indiquerons plus loin la façon de déterminer les courbes correspondant à l'emploi de résistances supplémentaires.

[2] Si l'on ne tenait pas compte de la résistance de frottement des engrenages, on trouverait au démarrage un couple positif, mais très faible.

(vitesse voisine de zéro), tandis que les courbes correspondantes d'un moteur à courant continu à excitation constante (p. 81) seraient des droites présentant des ordonnées croissantes quand la vitesse décroît et atteignant leur maximum à l'origine, c'est-à-dire au démarrage[1].

On peut tirer de ces remarques les conclusions suivantes :

1° Le moteur à courants polyphasés ne présente une marche *stable*[2] que dans des limites de vitesse assez étroites, c'est-à-dire entre la vitesse de synchronisme n_0 et celle n qui correspond au couple maximum. Dès que le moteur se ralentit au-dessous de n (égal à 15 km : h. dans l'exemple de la figure 691), il ne produit qu'un couple de plus en plus faible et arrive par suite forcément à l'arrêt si le couple résistant reste constant.

2° Le moteur à courants polyphasés n'a, dans ses conditions de marche normales, qu'un couple de *démarrage* fort inférieur au couple maximum et ne peut par conséquent démarrer sans des artifices particuliers, tels que l'addition de résistances, comme nous l'expliquerons plus loin.

Nous avons indiqué sur la figure 691 la façon dont les courbes se continuent vers la droite au delà de la vitesse du synchronisme ; on verra ci-dessous comment ces régimes, qui correspondent à une certaine récupération de l'énergie, peuvent se déduire des régimes ordinaires correspondant à la marche normale.

Ces notions sommaires et ces courbes caractéristiques suffisent pratiquement à rendre compte du fonctionnement des moteurs polyphasés ; d'autre part, les courbes de couple et de vitesse en fonction du courant, qu'on peut considérer comme de simples données expérimentales, permettent de raisonner sur eux de la même manière que sur les moteurs à courant continu sans entrer davantage dans le détail des phénomènes internes. Si l'on désirait cependant se faire une idée plus précise de la question et

[1] En général, les constructeurs dressent les courbes des moteurs asynchrones en fonction de la puissance portée en abscisse ; c'est une méthode à la fois irrationnelle, puisque la puissance est un produit de deux variables, et incommode, parce que la puissance passant par un maximum à une certaine vitesse toutes les courbes forment des boucles fermées, d'aspect peu clair. Les deux modes de représentation précédents sont donc préférables.

[2] En conservant pour la *stabilité* de marche la définition donnée plus haut (p. 75).

déterminer a priori le fonctionnement d'un moteur d'après ses données de construction, on pourrait y arriver rapidement par la méthode suivante, qui résume des publications plus complètes de l'un de nous [1].

Théorie plus complète. — Les enroulements inducteurs et induits du moteur se trouvent dans la même situation relative que les enroulements primaire a_1 et secondaire a_2 d'un transformateur dont les deux noyaux en fer à cheval $D_1 A_1 B_1 C_1$ et $D_2 A_2 B_2 C_2$ (fig. 692) seraient séparés par un entrefer $C_1 C_2 D_1 D_2$. Soient i_1 et i_2, à un instant quelconque, les intensités de l'un des courants primaires et de l'un des courants secondaires. L'enroulement primaire, s'il était seul, produirait un flux dont une partie φ_1 traverserait l'enroulement a_2 et le reste s'échapperait à travers l'air sous forme de fuites magnétiques représentées

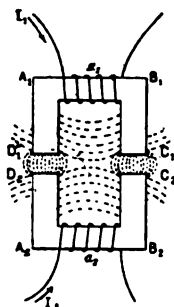


Fig. 692. — Principe des fuites magnétiques de l'inducteur et de l'induit.

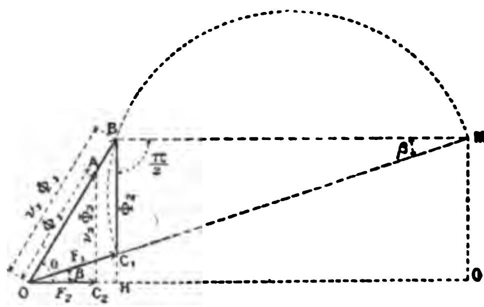


Fig. 693. — Composition du flux magnétique dans un moteur polyphasé.

en pointillé long; le flux qui traverse l'enroulement excitateur a_1 serait donc $v_1\varphi_1$, en appelant v_1 un coefficient plus grand que 1. De même, l'enroulement secondaire seul produirait à travers le circuit a_1 un flux φ_2 et, par suite des fuites magnétiques, donnerait dans a_2 un flux plus grand $v_2\varphi_2$. Les flux réels dans chaque enroulement seront les sommes algébriques des précédents, c'est-à-dire

$$f_1 = v_1 \varphi_1 - \varphi_2, \qquad \text{dans } a_1,$$

et

$$f_2 = \varphi_1 - v_2 \varphi_2, \qquad \text{dans } a_2.$$

Les amplitudes des flux seront les amplitudes de ces différences, c'est-à-dire, suivant la règle connue pour les fonctions sinusoïdales, les différences géométriques des amplitudes des fonctions considérées. Soient OA et BC_1 (fig. 693)

[1] Cf. A. Blondel : Théorie graphique des moteurs polyphasés, *Industrie Électrique*, 25 février 1896 ; Propriétés des champs tournants, *Éclairage Électrique*, mai 1895 ; Du rôle des fuites magnétiques dans les moteurs à champs tournants, *ibid.*, octobre, novembre et décembre 1895 ; Du coefficient de dispersion dans les moteurs à champ tournant, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1895, p. 625. — Lire aussi Bernard Behrend, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1896, p. 63.

les vecteurs représentant les amplitudes Φ_1 et Φ_2 des variables φ_1 et φ_2; les amplitudes des flux résultants seront donc les résultantes :

$$\begin{aligned} [\mathfrak{F}_1] &= [v_1 \Phi_1] - [\Phi_2], \quad \text{représentée par le vecteur } OC_1, \\ [\mathfrak{F}_2] &= [\Phi_1] - [v_2 \Phi_2], \quad \text{représentée par le vecteur } OC_2. \end{aligned} \tag{60}$$

L'angle des flux $\mathfrak{F}_2$ et Φ_2 est droit, parce que le flux Φ_2, produit par I_2, est proportionnel à la variation du flux inducteur dans l'induit $\mathfrak{F}_2$ qui donne lieu à la force électromotrice E_2 et l'on sait que le vecteur de la dérivée d'une fonction sinusoïdale est perpendiculaire au vecteur de cette fonction.

Le flux Φ_1 est produit dans un circuit magnétique dont nous appellerons la réluctance $\mathfrak{R}$ par $\frac{N_1}{2p}$ spires non concordantes et parcourues par des courants différents. Au lieu d'avoir, comme d'habitude avec le courant continu,

$$\Phi_1 = \frac{4\pi N_1 I_1}{2p\,\mathfrak{R}} = \frac{2\pi N_1 I_1}{p\mathfrak{R}},$$

on devra donc poser, en remarquant que l'amplitude des courants alternatifs est $I_1\sqrt{2}$:

$$\Phi_1 = \frac{2\pi N_1 I_1 \sqrt{2}}{p\mathfrak{R}} \times K_1 \tag{61}$$

et de même

$$\Phi_2 = \frac{2\pi N_2 I_2 \sqrt{2}}{p\mathfrak{R}} \times K_2, \tag{62}$$

$\mathfrak{R}$ étant la réluctance commune aux deux flux, N_1 et N_2 les nombres *totaux* de fils périphériques de l'inducteur et de l'induit, et K_1, K_2 deux coefficients dépendant du nombre de courants et de la répartition des enroulements; nous donnons dans le tableau ci-dessous les chiffres qui leur sont applicables.

VALEURS DES COEFFICIENTS *K* ET *k* POUR LE CALCUL DES FLUX ET DES F. É. M.

NOMBRE D'ENCOCHES par champ.	VALEURS DE *K* dans les formules 61 et 62.			VALEURS DE *k* dans les formules 63 et 64.		
	en triphasé.	en diphasé.	en monophasé.	en triphasé.	en diphasé.	en monophasé.
2	»	»	0,405	»	»	1,000
4	»	0,405	0,285	»	1,000	0,707
6	0,405	»	0,270	1,000	»	0,666
8	»	0,374	0,265	»	0,924	0,653
10	»	»	0,262	»	»	0,647
12	0,391	0,369	0,261	0,966	0,911	0,643
14	»	»	0,260	»	»	0,642
16	»	0,367	0,260	»	0,906	0,641
18	0,389	»	0,259	0,960	»	0,640
20	»	0,366	0,259	»	0,903	0,639
24	0,388	0,365	0,258	0,958	0,903	0,638
∞	0,386	0,365	0,258	0,953	0,900	0,637

Cela posé, soient toujours :

$2p$ le nombre de pôles tournants, T la fréquence des courants, Ω la vitesse angulaire $\frac{2\pi}{T} = 2\pi\, pn_0$,

g le glissement $\left(g = \frac{\Omega - \omega}{\Omega}\right)$,

N_1, N_2 les nombres *totaux* de fils périphériques dans les enroulements primaire et secondaire le long de l'entrefer,

q_1, q_2 les nombres de phases dans les enroulements primaire et secondaire,

r_1, r_2 les résistances,

λ_1, λ_2 les inductances de ces enroulements,

E_1, E_2, U les forces électromotrices induites efficaces, dans chaque circuit de ceux-ci, et la différence de potentiel étoilée aux bornes d'un circuit primaire,

I_2, I_2 les intensités de courant efficaces dans un fil quelconque du primaire et du secondaire,

Φ_1, Φ_2, $\mathfrak{F}_1$, $\mathfrak{F}_2$ les flux magnétiques tournants que nous venons de définir.

On démontre très aisément que les forces électromotrices induites par les flux tournants résultants dans les enroulements primaire et secondaire peuvent être déterminées par les équations

$$E_1 = \frac{1}{2\sqrt{2}}\, \Omega\, \frac{N_1}{q_1}\, \mathfrak{F}_1 \times k_1 \tag{63}$$

$$\text{et } E_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}}\, (\Omega - \omega)\, \frac{N_2}{q_2}\, \mathfrak{F}_2 \times k_2, \tag{64}$$

en appelant k_1 et k_2 deux coefficients dépendant encore de la construction des enroulements et qui figurent aussi dans le tableau de la page précédente.

Supposons calculés, par les méthodes indiquées par l'un de nous[1], les coefficients d'Hopkinson v_1 et v_2 relatifs aux deux circuits. Les coefficients K_1 et K_2 qui déterminent les ampères-tours équivalents de chaque circuit d'après la disposition des encoches et les coefficients k_1 et k_2 qui permettent de calculer de même les forces électromotrices induites sont donnés par le tableau (p. 291).

Le diagramme fondamental des flux établi ci-dessus (fig. 693) donne entre les angles θ et β la relation

$$\operatorname{tg} \beta = \left(1 - \frac{1}{v_1 v_2}\right) \operatorname{tg} \theta = \sigma \operatorname{tg} \theta, \tag{65}$$

σ étant ce que nous appellerons le coefficient de dispersion.

L'angle θ, représentant le décalage entre le courant I_2 et la f. é. m. E_2 qui le produit dans le circuit secondaire, s'exprime en fonction de la vitesse de pulsation $(\Omega - \omega)$ par la formule de M. Joubert

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{(\Omega - \omega)\lambda_2}{r_2} = g\zeta, \text{ en posant } \frac{\Omega\lambda_2}{r_2} = \zeta$$

Admettons pour simplifier le problème, comme on peut le faire sans grande erreur, que le flux $\mathfrak{F}_1$ est constant ; cela est sensiblement vrai dans les limites ordinaires de fonctionnement, grâce à la faible résistance ohmique du primaire ; car, en négligeant celle-ci, on sait que le flux $\mathfrak{F}_1$ est proportionnel à la différence de potentiel aux bornes.

[1] *Loc. cit.*

On peut alors remarquer que le point B se trouve sur un cercle constant ayant son diamètre sur OC_1[1]. En effet, par B menons une parallèle à OC_2 jusqu'à sa rencontre avec OC_1 ; l'angle en B est droit et le segment OM a pour valeur, d'après les triangles semblables OMG et OC_1H,

$$OM = OC_1 \times \frac{MG}{C_1H} = \frac{1}{\sigma} OC_1,$$

d'où

$$\overline{C_1M} = \overline{OC_1} \frac{1-\sigma}{\sigma};$$

OC_1 étant constant, le point B est sur un cercle de diamètre constant.

Cela étant, on peut supprimer les lignes OC_2 et AC_2, qui ne servent plus à rien, et placer la ligne OM horizontalement comme base du diagramme simplifié. D'autre part, les flux Φ_1 étant proportionnels aux courants I_1, la relation qui relie les premiers subsiste entre les seconds ; nous pouvons donc tracer immédiatement la figure 694, dans laquelle OB représentera le courant I_1, OC le courant magnétisant à vide i_0 (constant par suite de l'hypothèse même que $\mathfrak{F}_1$ est constant) et $OM = \frac{i_0}{\sigma}$. La force électromotrice induite primaire E_1 peut être représentée sur la droite OD perpendiculaire à la direction du flux $\mathfrak{F}_1$. Les pertes par courants de Foucault et hystérésis, étant constantes, donnent lieu à une composante $\overline{OS}$, constante, qui sera ce que nous avons appelé précédemment le courant de pertes j_1 ; le courant résultant est J_1.

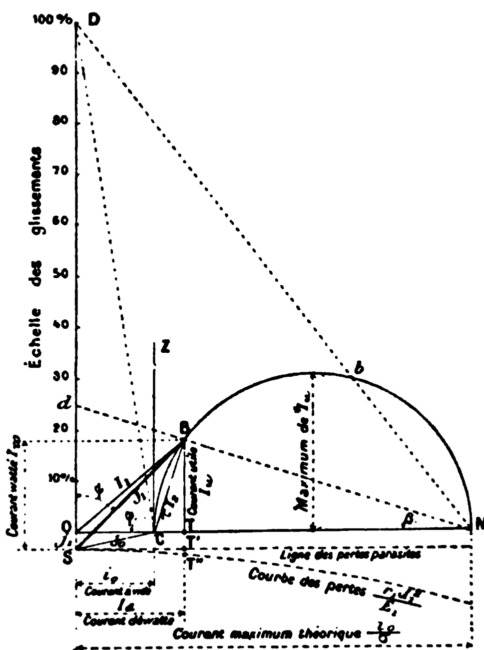


Fig. 694. — Épure fondamentale.

Il reste à représenter le glissement ; or l'angle en M est égal à β, et en prolongeant MB en d, on a en fonction de la réactance[2]

$$\overline{Od} = OM \operatorname{tg} \beta = \frac{i_0}{\sigma} \operatorname{tg} \beta = \left(i_0 \frac{\Omega\lambda_2}{r_2}\right) g.$$

[1] Cf. Heyland, *E. T. Z.*, 1895.

[2] On démontre aisément (*Éclairage Électrique*, t. V, p. 299) que la réactance $\Omega\lambda_2$ a pour valeur très sensiblement

$$\frac{v_2}{v_1} \left(\frac{N_2K_2}{N_1K_1}\right)^2 \frac{q_1U}{i_0},$$

d'où la constante

$$\left(\frac{i_0\Omega\lambda_2}{r_2}\right) = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{N_2K_2}{N_1K_1}\right)^2 \frac{q_1U}{r_2},$$

expression facile à calculer.

Cela permet de calculer g par la formule

$$g = \frac{\overline{Od} \times r_2}{q_1 U} \times \frac{v_1}{v_2} \left(\frac{N_1 K_1}{N_2 K_2}\right)^2. \qquad (66)$$

Les segments Od sont donc proportionnels aux glissements. Si l'on fait en C un angle DCO $= \varphi_2$, tel que

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\Omega \lambda_2}{r_2} = \zeta,$$

il suffit de graduer le segment OD en 100 parties égales pour que les longueurs Od interceptées par les sécantes MB donnent directement les glissements g en centièmes[1].

La même épure donne tous les autres renseignements désirables.

Le courant I_1 se décompose en deux composantes :

1° Le courant watté utile $I_u = \overline{BT}$;

2° Le courant déwatté $I_d = \overline{OT}$.

Le courant watté total est $I_w = \overline{BT'}$.

La puissance utile serait $q_1 E_1 I_u$ s'il n'y avait pas de pertes par glissement. En tenant compte du rendement de l'induit, qui est $(1-g)$, elle se réduit à

$$P_u = (1 - g)\, q_1 E_1 I_u. \qquad (67)$$

La puissance fournie par le primaire est

$$P_1 = q_1 E_1 I_w + q_1 r_1 J_1^2 = q_1 E_1 \left(I + \frac{r_1 J_1^2}{E_1}\right). \qquad (68)$$

Si l'on porte au-dessous de chaque point T' de la droite IT' une ordonnée égale à $\frac{r_1 J_1^2}{E_1}$, facile à calculer d'après la figure qui donne J_1, on obtient un point T'', et l'on a

$$P_1 = \overline{BT''} \times q_1 E_1$$

et pour le rendement

$$\eta = (1 - g) \frac{\overline{BT}}{\overline{BT''}}.$$

Le couple a pour valeur

$$C = \frac{p}{\omega} P_u = \frac{p}{\Omega} \frac{P_u}{1-g} = \frac{p q_1 E_1}{\Omega} I_u = \frac{p q_1 E_1}{\Omega} \overline{BT};$$

il est donc proportionnel à l'ordonnée BT du cercle.

Le facteur de puissance a pour valeur le cosinus de l'angle ψ fait par les vecteurs E et J_1,

$$\cos \psi = \frac{I_w}{J_1}.$$

[1] Si l'on est gêné pour faire tenir l'échelle des glissements tout entière dans l'épure, on la rapproche du point M, en la réduisant proportionnellement.

Enfin, si l'on remarque que la ligne CB correspond à la ligne $C_1B = \Phi_2$ de la figure 693, on a sa valeur

$$\overline{CB} = \frac{I_1}{\Phi_1} \times \Phi_2 = \left(\frac{K_2 v_2 q_1 N_2}{K_1 v_1 q_2 N_1}\right) I_2.$$

Elle représente en grandeur et phase le courant secondaire multiplié par le rapport de transformation

$$\frac{K_2 v_2 q_1 N_2}{K_1 v_1 q_2 N_1} = \tau,$$

que la plupart des auteurs écrivent incorrectement $\frac{q_1 N_2}{q_2 N_1}$, parce qu'ils ne tiennent compte ni des pertes, ni de la forme des enroulements.

Le diagramme de la figure 694 indique donc d'une manière complète comment varient, pour un moteur donné, les courants primaire et secondaire, le couple et le facteur de puissance.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons pas calculé l'effet de la chute de potentiel dans le primaire; si le moteur est placé sur un réseau à potentiel constant U, cette chute réduit la force électromotrice E_1 et le champ $\mathfrak{F}_1$.

Il est facile de compléter la solution par une *correction* faite après coup, qui permet, si on le désire, de tenir compte de cet effet, d'ailleurs peu important aux charges moyennes. Pour cela, il suffit de remarquer que, si l'on change la valeur de E_1, toutes les lignes de l'épure varieront proportionnellement entre elles et à E_1 [1]. D'autre part, la perte de charge est toujours très faible devant la force électromotrice totale et peut, par suite, être mesurée avec une exactitude très suffisante par la projection du vecteur $r_1 J_1$ sur la direction de E_1, c'est-à-dire par le produit $r_1 I_w$. On a donc la formule approchée

$$E_1 = U - r_1 I_w,$$

c'est-à-dire que la valeur de E_1 doit être réduite dans le rapport

$$\alpha = \frac{E_1}{U} = 1 - \frac{r_1 I_w}{U},$$

qu'on calcule pour chaque régime ; toutes les lignes de l'épure correspondant à ce régime doivent être réduites dans la même proportion.

Il suffit donc de mesurer au régime considéré, sur l'épure de première approximation, les intensités J_1, I_2, I_w et d'en déduire le facteur α, puis, de multiplier toutes les intensités par le facteur de correction α, le couple et la puissance par le facteur α^2. Le facteur de puissance et le rendement, étant des rapports de lignes, n'ont pas à être modifiés.

L'épure ainsi corrigée donne une précision plus que suffisante pour la pratique.

La simple inspection de la figure permet d'écrire à peu près sans calcul toutes

[1] Parce que le fer dans ces moteurs travaille toujours à de très basses inductions.

les formules nécessaires, si l'on veut calculer algébriquement, au lieu de suivre simplement le graphique. On a en effet :

$$\overline{MB} = \overline{MC} \cos \beta = i_0 \frac{1 - \sigma}{\sigma} \cos \beta$$

et

$$\overline{MT} = i_0 \frac{1 - \sigma}{\sigma} \cos^2 \beta$$

d'où

$$I_u = i_0 \frac{1 - \sigma}{\sigma} \sin \beta \cos \beta, \tag{69}$$

$$I_d = \frac{i_0}{\sigma} [1 - (1 - \sigma) \cos^2 \beta] = i_0 \frac{1 + \sigma \zeta^2 g^2}{1 + \sigma^2 \zeta^2 g^2}, \tag{70}$$

$$C = \frac{pq_1 E_1 i_0 (1 - \sigma) \sin \beta \cos \beta}{\Omega\sigma} = \frac{pq_1 E_1 i_0 (1 - \sigma)}{\Omega\sigma} \frac{\sigma\zeta g}{1 + \sigma^2\zeta^2 g^2}, \tag{71}$$

$$I_1 = \sqrt{I_u^2 + I_d^2}, \qquad P_u = I_u q_1 U, \tag{72}$$

$$I_2 = \frac{v_1 q_2 N_1 K_1}{v_2 q_1 N_2 K_2} i_0 \frac{1 - \sigma}{\sigma} \sin \beta = \frac{v_1 q_2 N_1 K_1}{v_2 q_1 N_2 K_2} i_0 \frac{1 - \sigma}{\sigma} \frac{\sigma\zeta g}{\sqrt{1 + \sigma^2\zeta^2 g^2}}, \tag{73}$$

$$\cos \psi = \frac{I_w + j_1}{J_1}, \text{ etc.} \tag{74}$$

Toutes les inconnues sont ainsi exprimées en fonction du glissement g.

Rien n'est donc plus facile que de construire les courbes caractéristiques approximatives d'un moteur lorsqu'on connait ses constantes calculées ; ces courbes peuvent s'obtenir, du reste, par simple transformation graphique du cercle fondamental de la figure 694.

La figure 695 donne, à titre d'exemple, l'épure polaire du moteur défini par les courbes de la figure 690 et qui a pour constantes supposées connues :

courant magnétisant à vide	$i_0 = 20$ ampères,
coefficient de fuites	$\sigma = 0,12$,
résistance primaire	$r_1 = 0,12$ ohm pour un circuit (triphasé),
— secondaire	$r_2 = 0,007$ ohm pour un circuit (diphasé).
réactance secondaire	$\Omega\lambda_2 = 0,495$ ohm par circuit.

On en déduit aussitôt le diamètre du cercle D = 146 ampères et l'échelle des glissements. Une fois ce cercle et cette échelle tracés, on a tous les éléments de l'épure; nous avons supposé une perte d'énergie par hystérésis correspondant à 2 ampères qui donne le point S. Le point B correspond au régime normal.

On trouve aisément, pour les régimes suivants, les valeurs de g :

régime du couple maximum, $g = \frac{1}{\zeta\sigma}$ sensiblement; d'où

$$C_m = \frac{pq_1 E_1 i_0 (1 - \sigma)}{2\Omega\sigma}; \tag{75}$$

régime du facteur de puissance maximum, $g = \frac{1}{\zeta\sqrt{\sigma}}$,

et l'on en déduira les valeurs correspondantes des inconnues.

La théorie que nous venons d'exposer suffit à rendre compte des conditions ordinaires de fonctionnement des moteurs à champ tournant. On trouvera

dans les beaux travaux de M. Potier[1] une analyse plus profonde, qui donne l'explication des anomalies que l'on constate quelquefois.

Influence des éléments de construction. — Les constantes de construction caractéristiques d'un moteur sont, d'après ce qui précède, le courant magnétisant i_o, le coefficient de fuites σ et la résistance secondaire r_2.

Le coefficient de fuites σ doit être réduit autant qu'il est possible pour augmenter le couple maximum et le facteur de puissance ; ce résultat s'obtient en

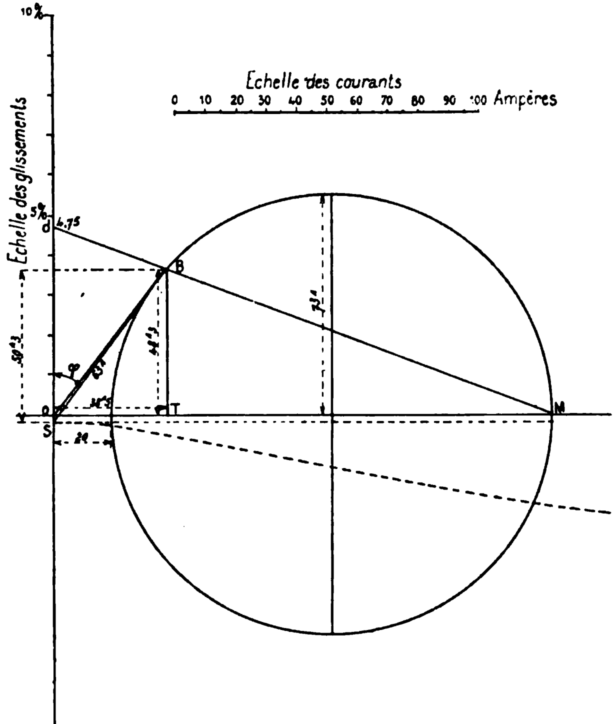


Fig. 695. — Application de l'épure polaire à un exemple : moteur de tramway polyphasé de 15 chevaux.

réduisant l'entrefer et le nombre des pôles, augmentant le nombre des encoches et pratiquant des saignées dans celles-ci.

Le courant magnétisant i_o ne joue pas un rôle moins important : c'est la vraie déterminante du couple, qui lui est proportionnel. De son côté, i_o est proportionnel directement à la réluctance du circuit magnétique et inversement au nombre de spires primaires ; si on le réduit en augmentant ce nombre et en réduisant l'entrefer, on améliore beaucoup le facteur de puissance ; mais cela peut être au détriment du couple, si l'on ne réduit pas en même temps le

[1] Voir ses deux remarquables Notes sur les moteurs asynchrones dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 15 et 29 mars 1897.

coefficient de fuites. L'expérience des meilleurs constructeurs montre qu'on ne pourra guère, pour un moteur de traction, dépasser un facteur de puissance $\cos \psi = 0,85$ à $0,90$.

Deux moteurs d'entrefers différents, calculés de manière à réaliser le même i_0, donneront des couples et facteurs de puissance maxima très inégaux par suite des valeurs différentes de σ et de N_1.

Une modification du nombre des pôles $2p$ ne change pas l'expression de la puissance maxima,

$$P = (1 - g) \frac{q_1 U i_0}{2\sigma} (1 - \sigma) = \text{sensiblement} \left(1 - \frac{1}{\sigma\zeta}\right) \frac{q_1 U i_0}{2\tau} (1 - \sigma); \quad (76)$$

mais, en admettant même qu'on réalise le même glissement et le même courant magnétisant par un choix convenable de la résistance secondaire, de l'induction et du nombre des spires, la puissance du moteur décroit quand on augmente le nombre des pôles, parce que les fuites σ augmentent rapidement lorsqu'on diminue le nombre d'encoches par champ.

Quant à l'influence de r_2, elle se fait sentir un peu sur la vitesse correspondant au couple maximum et surtout sur l'échauffement et le rendement du moteur : plus la résistance normale est faible, moins il y a de pertes d'énergie et par suite d'échauffement, mais plus le moteur devient lourd et coûteux de construction, en raison de l'augmentation de dimensions qui en résulte.

§ 2. — Régulation de marche

Comme on le sait, l'objet de la régulation de vitesse est de réaliser soit divers efforts moteurs à la même vitesse, soit diverses vitesses sous une même charge. Dans le cas des moteurs polyphasés, ces deux résultats s'obtiennent à l'aide de moyens différents ; nous examinerons donc les deux questions séparément.

Marche à vitesse constante. — Ainsi qu'on l'a vu plus haut, tant que la fréquence des courants polyphasés reste constante, ce qui est le cas forcé car on ne peut guère distribuer le long d'une même ligne des courants de fréquence différente, et qu'on ne modifie ni les enroulements ni la résistance de l'induit, la vitesse d'un moteur à champ tournant reste sensiblement la même à toute charge. Ce type de moteur se prête donc admirablement à la marche à vitesse constante et le couple se proportionne de lui-même à l'effort résistant. Mais il est loin de présenter le même accroissement avec le courant que le couple d'un moteur à courant continu en série et même shunt ; ce moteur est donc

condamné soit à manquer d'élasticité et à risquer de s'arrêter sur une rampe, soit à travailler normalement à une trop faible charge, ce qui donne lieu à un courant déwatté considérable et disproportionné, en même temps que la puissance spécifique de l'appareil est très réduite.

Pour échapper à ces inconvénients, le seul moyen est d'agir sur le second facteur du couple en faisant varier l'intensité des champs inducteurs. Si l'on appelle, en effet, toujours $\mathfrak{F}_1$ le flux résultant dans le circuit inducteur, $\mathfrak{F}_2$ le flux à travers le circuit induit, le couple moteur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à $\mathfrak{F}_2^2$ et par suite à $\mathfrak{F}_1^2$.

Plus rigoureusement, en conservant les notations de la théorie donnée ci-dessus, on a pour l'expression du couple électromagnétique

$$C = p \frac{q_1^2 E^2}{(\Omega - \omega) q_2 r_2} = p \frac{\Omega - \omega}{8 r_2 q_2} (k_2 N_2 \mathfrak{F}_2)^2 = p \frac{\operatorname{tg} \theta}{8 \lambda_2 q_2} (k_2 N_2 \mathfrak{F}_2)^2 \qquad (77)$$

et, d'autre part, on déduit de la figure 693 la relation

$$\mathfrak{F}_2 = \frac{\mathfrak{F}_1}{v_1 \sqrt{1 + \sigma^2 \operatorname{tg}^2 \theta}}, \qquad (78)$$

d'où

$$C = p \frac{\operatorname{tg} \theta}{1 + \sigma^2 \operatorname{tg}^2 \theta} \frac{(k_2 N_2 \mathfrak{F}_1)^2}{8 v_1^2 \lambda_2 q_2}, \qquad (79)$$

dont le maximum est

$$C_{max} = \frac{p}{2\sigma} \frac{(k_2 N_2 \mathfrak{F}_1)^2}{8 v_1^2 \lambda_2 q_2}. \qquad (80)$$

Si dans cette expression on suppose les coefficients λ_2, v_1 et v_2, et par suite σ, constants, on voit que le couple maximum est bien proportionnel au carré du flux $\mathfrak{F}_1$. En réalité, v_1 et σ augmentent et λ_2 diminue lorsqu'on augmente le flux, par suite de la saturation croissante du fer, qui donne aux fuites magnétiques une importance relative de plus en plus grande ; mais, tant que l'induction magnétique dans l'inducteur ne dépasse pas 12 000 à 13 000 c. g. s., la variation de $v_1^2 \sigma \lambda_2$ est faible.

Cette variation du flux primaire peut s'obtenir, en pratique, de deux manières différentes, par variation de la tension appliquée aux bornes du moteur ou par modification des enroulements inducteurs.

1° Variation de la tension aux bornes. — L'accroissement de la tension aux bornes U entraîne une augmentation de flux, puisqu'on a sensiblement, en appelant I_w le courant primaire utile

$$U - r_1 I_w = \frac{k_1}{2\sqrt{2}} \Omega \frac{N_1}{q_1} \mathfrak{F}_1, \qquad (81$$

ou, en négligeant pratiquement la chute de potentiel dans l'enroulement r_1 devant U,

$$\mathfrak{F}_1 = q_1 U \frac{2\sqrt{2}}{\Omega N_1 k_1}.$$

D'où l'on tire, en substituant dans (80),

$$C_m = p \left(\frac{k_2 N_2}{k_1 N_1}\right)^2 \frac{(q_1 U)^2}{2 \Omega \sigma v_1^2 \lambda_2 q_2}. \qquad (82$$

Pour les applications, comme il est difficile de calculer sûrement v_1 et σ, il est bon de relever expérimentalement les valeurs du couple maximum pour une série de valeurs de v.

On ne doit mettre en usage cette méthode de variation du couple que pour renforcer momentanément l'effort de traction au moment des démarrages ou sur les fortes rampes. Dans ce dernier cas, la variation de la tension aux bornes pourrait s'obtenir d'une manière fixe et indépendante du mécanicien en isolant les sections de lignes situées le long des rampes et les alimentant à l'aide de transformateurs donnant un potentiel de distribution un peu plus élevé que sur les autres parties du réseau.

Si l'on veut laisser au mécanicien la libre disposition de la variation du champ de façon qu'il puisse l'utiliser aux démarrages, on placera simplement sur chaque voiture un ou plusieurs transformateurs appropriés jouant le rôle de survolteurs. Les circuits primaires C_1, C_2 de ces transformateurs (fig. 696), alimentés directement par les lignes[1], induiront dans les circuits secondaires C_1', C_2', placés en série avec le moteur, des forces électromotrices qui s'ajouteront aux tensions de distribution ; on pourra les faire varier soit en réduisant plus ou moins le courant primaire à l'aide d'une

[1] La figure suppose qu'il s'agit de courants diphasés ; on aurait une disposition analogue avec les courants triphasés. Le retour des courants se fait par les rails.

self-induction, soit en prenant plus ou moins de spires en série sur le circuit secondaire.

Au lieu de transformateurs séparés, on pourrait aussi employer, comme l'a proposé la General Electric Co., un moteur polyphasé arrêté et jouant le rôle de transformateur. En effet, en disposant sur l'arbre une commande par engrenages ou par vis qui permette d'amener la partie mobile dans différentes positions et de l'y maintenir, on peut faire varier l'induction du primaire sur le secondaire de zéro à un maximum avec la plus grande facilité. Un

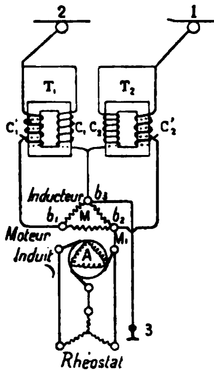


Fig. 696. — Schéma du montage d'un moteur diphasé avec transformateur survolteur pour la régulation de l'effort moteur (l'excitation supplémentaire étant fournie par les circuits dérivés C_1, C_2).

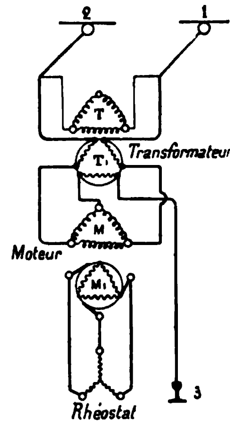


Fig. 697. — Schéma du montage d'un moteur triphasé avec survolteur à champ tournant formé d'un moteur immobile (la borne supérieure de T à la terre).

semblable transformateur peut être construit avec un entrefer plus petit qu'un moteur et avec un nombre de pôles assez réduit pour que le facteur de puissance et le rendement soient satisfaisants. La figure 697 représente schématiquement le montage des appareils.

Le survolteur serait calculé, dans tous les cas, en vue de pouvoir supporter *momentanément* un courant égal à celui du moteur dans les circonstances prévues, tout en fournissant le supplément de force électromotrice reconnu nécessaire. On aurait autant de transformateurs de ce genre ou de branches de transformateurs qu'il y a de courants polyphasés inducteurs; on ne les mettrait en service que pendant les moments de surcharge.

On pourrait encore arriver au même résultat en laissant normalement en circuit avec le moteur des bobines de self-induction, absorbant une certaine tension et dont on réduirait le nombre de spires momentanément pour faire face aux à-coup; mais cette méthode entraînerait une dépense d'énergie continue.

Ces dispositifs peuvent présenter un réel intérêt sur les lignes un peu longues où les pertes de voltage sont sensibles, car ces pertes, qui ne modifient pas le couple d'un moteur à courant con-

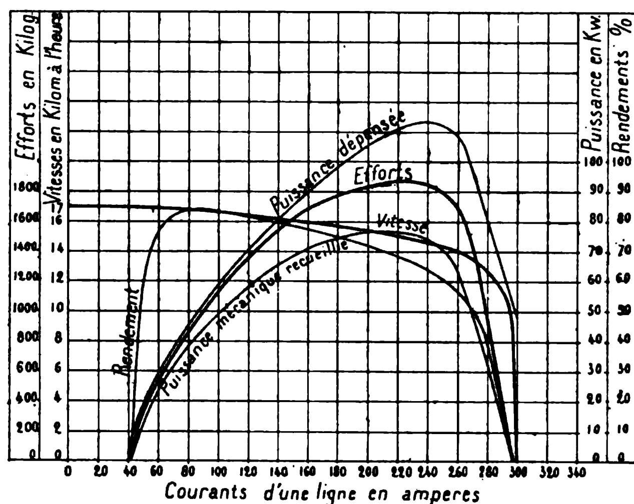


Fig. 698. — Courbes de fonctionnement du moteur de la figure 690, alimenté à 440 volts au lieu de 220.

tinu en série, réduisent au contraire l'effort moteur d'un moteur à courants alternatifs d'une façon souvent très gênante et risqueraient d'amener des arrêts de la voiture précisément aux points où la charge est le plus forte. Pour ce motif, on devra se préoccuper de réduire au minimum les pertes de charge sur les lignes de ce genre.

Régimes d'un moteur quand on change le voltage aux bornes ou les connexions du bobinage. — Le changement de bobinage ou de voltage se traduit par un changement du courant magnétisant et des coefficients de fuites v_1, v_2 et σ. Ces modifications sont faciles à relever expérimentalement. Avant toute expérience, le nouveau courant magnétisant peut être déterminé aisément en calculant d'après le nombre de spires le flux nécessaire pour produire une force électromotrice égale sensiblement à la tension aux bornes; on en déduit les valeurs nouvelles des inductions magnétiques dans les diverses parties du

moteur et par suite les nouveaux coefficients de fuites. Dans les limites ordinaires, les perméabilités varient peu et σ conserve à peu près la même valeur; dans le moteur de la figure 690, par exemple, si l'on double le voltage d'alimentation aux bornes, on trouve $\sigma = 0,14$ au lieu de 0,12 et $i_0 = 42$ ampères; la figure 698 représente les nouveaux régimes correspondant aux nouvelles conditions d'alimentation.

Pour se faire une idée rapide de celles-ci, il suffit de supposer que les perméabilités n'ont pas changé, ni le coefficient σ; on voit ainsi qu'en doublant le voltage aux bornes on double le courant magnétisant et le courant en court-circuit et on quadruple le couple maximum, proportionnel au produit du voltage par l'ordonnée maxima du cercle. L'épure polaire de la figure 695 pourrait donc servir sensiblement au nouveau cas en supposant simplement l'échelle des courants réduite de moitié.

Les conditions sont un peu plus complexes quand on modifie les connexions du bobinage inducteur, car on produit ainsi une variation non seulement de i_0, mais de σ et de r_1, de sorte que l'épure est entièrement à refaire; mais il n'y a à cela aucune difficulté lorsqu'on suit les indications données plus haut.

2° *Modification des enroulements inducteurs.* — Au lieu de changer la tension aux bornes, on peut modifier le bobinage des inducteurs.

Dans le cas d'un moteur triphasé, cette modification peut se réduire à un simple changement de connexions. En passant, en effet, du groupement étoilé au groupement en triangle (fig. 699), on augmente, d'après une propriété connue, la tension efficace réelle entre les extrémités de chaque circuit de phase dans le rapport de 1 à $\sqrt{3}$ et le résultat est le même que si, sans toucher à l'enroulement, on avait augmenté dans la même proportion les tensions de distribution[1].

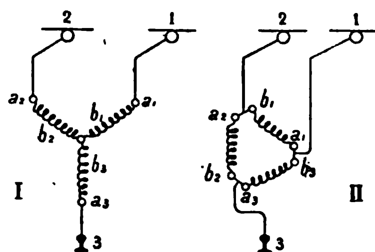


Fig. 699. — Changement de connexions de l'inducteur pour passer du montage en étoile (I) au montage en triangle (II).

On arriverait à un résultat analogue en constituant les enroulements primaire et secondaire avec un même nombre de phases et des nombres de spires différents, et intervertissant leurs rôles par un commutateur. Par exemple, si le rapport des spires est de

[1] Dans un moteur diphasé, on peut faire varier de même la tension agissante dans le rapport de 1 à $\sqrt{2}$ en passant du groupement étoilé au groupement polygonal; mais cette modification est impossible dans un moteur diphasé à 3 fils comme ceux applicables à la traction; c'est là pour ces derniers une sérieuse infériorité.

4 pour l'inducteur et de 3 pour l'induit, et qu'on intervertisse leurs rôles, le champ se trouve augmenté dans le rapport $\frac{4}{3}$ et le couple dans un rapport voisin de $\frac{16}{9}$.

Mais on perd ainsi l'avantage de pouvoir faire des induits à barres et l'on risque d'avoir des nombres d'encoches ayant un commun multiple, ce qu'on doit éviter (t. I, p. 247).

Au lieu de ces artifices simples, mais très limités, on peut diviser l'enroulement de chaque circuit de phase en deux ou plusieurs autres que l'on couple tantôt en série et tantôt en dérivation, tout comme on le fait pour les moteurs à courant continu dans le

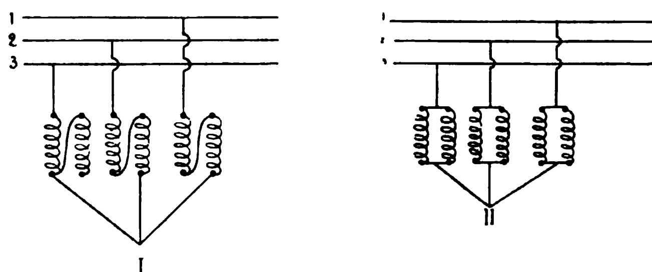


Fig. 700. — Changement de connexions des enroulements inducteurs d'un moteur triphasé divisés en demi-bobines pour la régulation de l'effort moteur.
I. Excitation minima. — II. Excitation maxima.

système Sprague. Il suffit, pour pouvoir employer cette méthode, que l'enroulement de chaque phase comprenne plus d'une encoche par pôle.

Supposons, par exemple, que l'on ait affaire à un moteur triphasé semblable à ceux dont nous avons exposé plus haut le mode de bobinage (t. I, p. 246) et ayant deux encoches par phase dans chaque pôle ; on pourra diviser l'enroulement correspondant à cette phase en deux moitiés comportant l'une les spires placées seulement dans les premières encoches et l'autre les spires placées dans les secondes encoches. L'enroulement en tambour de la première phase sera ainsi formé des deux moitiés

$$+1 - 7 + 13 - 19 + 25 - 31, \text{ etc.}$$

et

$$+2 - 8 + 14 - 20 + 26 - 32, \text{ etc.},$$

que l'on groupera à volonté en série ou en dérivation ; il en sera de même pour les autres phases. On pourra donc, en groupant

les circuits d'abord en série, puis isolément, puis en parallèle, comme le montre la figure 700, faire varier l'excitation du simple au double, puis au quadruple.

En mettant 3 encoches par pôle, on aurait 9 circuits et l'on pourrait faire varier l'excitation dans des proportions plus grandes encore ; mais c'est inutile et les commutateurs deviendraient alors trop compliqués ; on ne peut guère, du reste, mettre plus de 2 encoches par phase dans les moteurs de tramways, par suite du faible diamètre d'alésage et du grand nombre de pôles nécessaire.

En combinant dans un moteur triphasé ces décompositions d'enroulement avec les changements de groupement indiqués plus haut, c'est-à-dire en appliquant à chacune des combinaisons sur des parties de circuit le groupement triangulaire, puis étoilé, on peut doubler le nombre des régimes; mais d'aussi grandes variations ne seront généralement pas nécessaires et, d'autre part, les courants correspondants dans l'inducteur pourraient dépasser les limites fixées par l'échauffement.

Pour les moteurs diphasés alimentés par un réseau à 3 fils, qui n'ont qu'un seul mode de groupement, la variation de champ ne peut s'obtenir que par commutation des parties d'enroulement, et, comme il n'y a que deux circuits, cette commutation est moins compliquée que pour les moteurs triphasés.

3° Groupements série-parallèle. — Dans le cas où l'équipement des voitures comporte deux moteurs, on pourrait appliquer utilement, croyons-nous, une méthode analogue à la méthode série-parallèle pour les moteurs à courant continu, c'est-à-dire grouper les circuits inducteurs des deux moteurs tantôt en série, tantôt en parallèle, par rapport aux divers courants allant des conducteurs de distribution au point de retour, ainsi que l'indiquent les schémas des figures 701

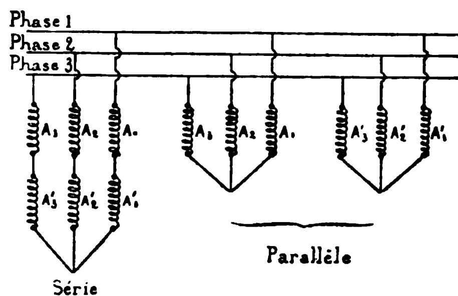


Fig. 701. — Groupements de deux moteurs triphasés en série et en parallèle.

et 702. Grâce à cette disposition, on pourrait faire varier du simple au double la tension appliquée à chacun des moteurs sans changer en rien leurs enroulements.

Contrairement à ce qui se fait pour les équipements à courant continu, il conviendrait d'appliquer cette méthode en adoptant le groupement en série pour la marche normale et le groupement en parallèle pour les coups de collier et les démarrages. Le but poursuivi est, en effet, non plus de réduire le courant, mais d'accroître le couple maximum disponible. On y gagnerait aussi certains avantages de construction, car il est plus facile de bobiner les moteurs et de conserver leur isolement quand leur voltage est plus bas.

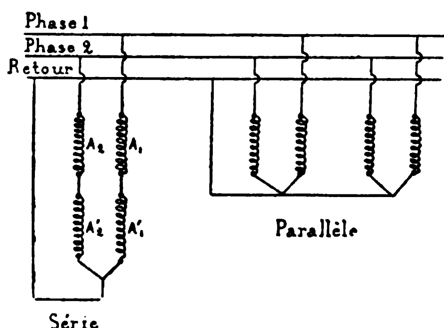


Fig. 702. — Groupements de deux moteurs diphasés en série et en parallèle.

Les courbes de fonctionnement dans les deux cas ont entre elles les mêmes relations que si l'on modifiait le voltage aux bornes du simple au double, comme au paragraphe précédent.

On remarquera que dans les deux groupements la vitesse reste la même, ce qui différencie complètement cette méthode de la régulation série-parallèle ordinaire, où la vitesse varie du simple au double. On verra plus loin (p. 314) un mode de groupement en cascade équivalent à cette dernière.

Variation de la vitesse. — La vitesse étant, en régime normal, sensiblement synchronique de celle de la génératrice, on ne pourrait, en se bornant à l'emploi des méthodes précédentes, marcher qu'à une seule allure. Pour la modifier on doit recourir à l'un des procédés suivants :

1° Méthode du rhéostat. — L'artifice le plus simple consiste à intercaler des résistances variables dans les circuits de l'induit à l'aide de rhéostats manœuvrés simultanément. Les figures 703 et 704 représentent schématiquement la disposition de ces rhéostats

pour des induits tournants de moteurs triphasés et diphasés. Les courants secondaires, produits dans les bobines *ab* aboutissant à des bagues B, sont recueillis par des frotteurs qui les envoient aux bornes de rhéostats; si l'induit est fixe, les rhéostats sont reliés directement à ces bornes. On remarquera que le rhéostat diphasé nécessite un conducteur de retour, tandis que dans le rhéostat triphasé monté en étoile[1] les trois courants viennent s'annuler réciproquement sur l'axe des trois manettes venues de fonte ensemble.

Lorsqu'on emploie pour les induits le bobinage en barres, les courants secondaires présentent un faible voltage et de grandes intensités; il est alors nécessaire, pour éviter l'emploi de câbles

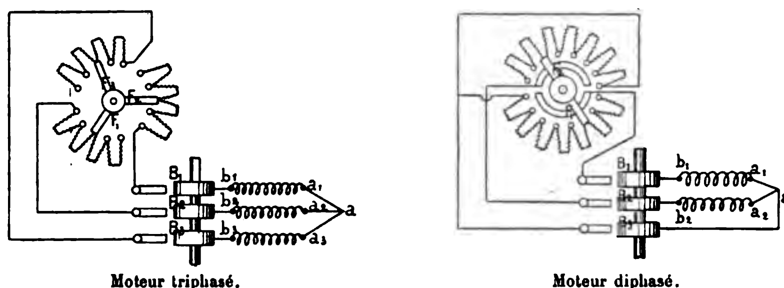


Fig. 703 et 704. — Schéma de la disposition d'un rhéostat de régulation de vitesse intercalé dans les circuits de l'induit d'un moteur triphasé ou diphasé.

trop considérables, de placer les rhéostats au voisinage immédiat des moteurs et de les manœuvrer des plates-formes à l'aide d'une transmission par cordes et poulies; c'est ainsi, par exemple, que MM. Brown, Boveri et C[ie] ont disposé l'équipement des voitures de Lugano (fig. 229, t. I, p. 251), dont la figure 705 représente le rhéostat.

On peut aisément se rendre compte de l'effet retardateur que produisent les résistances dans l'induit de la manière suivante.

Les expressions du courant primaire I_1 et du couple C données plus haut (p. 296) sont des fonctions d'une seule variable, qui est le rapport

$$\frac{(\Omega - \omega)\lambda_2}{r_2} = g\frac{\Omega\lambda_2}{r_2} = g\zeta.$$

[1] La même disposition s'applique aussi bien au cas d'un induit monté en triangle; rien n'empêche, si on le désire, d'employer un rhéostat également en triangle, mais ce serait moins simple.

Si l'on ne modifie pas l'enroulement, $\Omega\lambda_2$ est sensiblement constant entre certaines limites ; ces expressions sont donc fonctions seulement du rapport du glissement à la résistance secondaire

$$\frac{g}{r_2}.$$

Si l'on modifie la résistance r_2 par addition d'une résistance extérieure R_2, on obtiendra les mêmes valeurs de courant et de

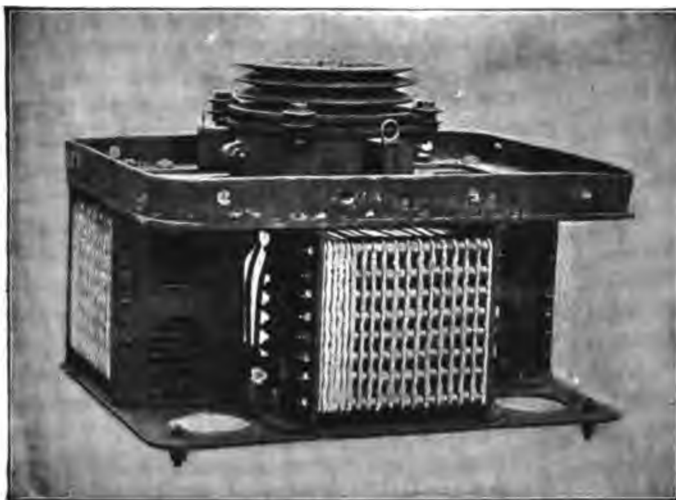


Fig. 705. — Rhéostat des voitures de Lugano.

couple pour un glissement g', plus grand que le précédent g et tel que

$$g' = g\,\frac{R_2 + r_2}{r_2} = g\left(1 + \frac{R_2}{r_2}\right). \qquad (83)$$

On pourra donc, pour toute valeur de l'effort résistant, réduire, sans changer cet effort, la vitesse normale V dans un rapport quelconque $\frac{V'}{V}$ en ajoutant à chaque circuit une résistance R telle que

$$\frac{1 - g'}{1 - g} = \frac{V'}{V},$$

d'où, en substituant la valeur de g',

$$R_2 = r_2\left(\frac{1 - g}{g}\right)\left(1 - \frac{V'}{V}\right). \qquad (84)$$

Cette expression permet de calculer très aisément les rhéostats à employer. On prendra, par exemple, trois touches, comme dans les rhéostats pour moteurs à courant continu; on pourra les choisir de façon que les vitesses soient successivement $\frac{V}{4}$, $\frac{V}{2}$ et $\frac{3}{4}$ V, et l'on admettra pour valeur de g celle qui correspond au régime moyen sans rhéostat. Nous donnons ci-dessous plus de détails sur ce calcul.

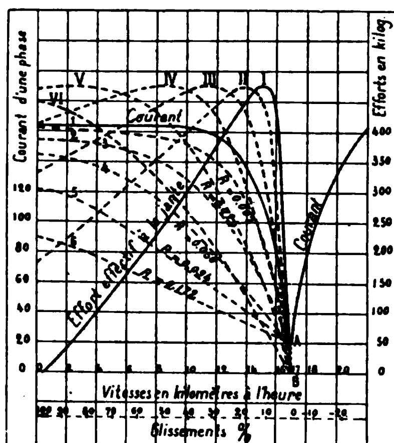


Fig. 706. — Fonctionnement d'un moteur polyphasé avec résistances supplémentaires ajoutées à l'induit. Courbes rapportées aux vitesses.

Traits pleins : courbes d'effort (I) et de courant (1) sans résistances.
Traits pointillés : courbes avec résistances : (II), (III), (IV), (V) et (VI) efforts correspondant aux courbes de courant (2), (3), (4), (5), (6) ; les résistances inscrites sur ces dernières sont les sommes des résistances ajoutées aux circuits secondaires.

Régimes d'un moteur avec résistances supplémentaires dans l'induit. — Sur les graphiques en coordonnées polaires ou rectangulaires, l'effet d'un changement de résistance secondaire se traduit tout simplement, d'après la remarque qui précède, par un changement d'échelle de l'axe des glissements. Par exemple, si l'on fait $R_2 = r_2$, ce qui double la résistance secondaire, l'échelle des glissements devra être réduite de moitié de façon qu'un même couple corresponde à un glissement double.

Pour les courbes en coordonnées rectangulaires, on peut soit modifier l'échelle des abscisses, soit conserver la même échelle en amplifiant la courbe dans le sens des abscisses suivant le rapport $\frac{R_2 + r_2}{r_2}$. La figure 706 représente, par exemple, les courbes de couple et de courant en fonction de la vitesse qu'on obtient pour le moteur défini par les figures 690 et 691 avec diverses valeurs successives de la résistance supplémentaire. Le maximum se déplace, mais en conservant la *même valeur* dans tous les cas.

On voit que tout effort compris entre zéro et l'effort maximum peut être réalisé avec n'importe quelle vitesse comprise entre la vitesse du synchronisme et la vitesse normale; en réalité, la série des couples et des vitesses est unique et la résistance secondaire détermine seulement la portion utilisable de cette série.

Lorsqu'on réalise un même couple à différentes vitesses par ce procédé, l'intensité du courant reste donc la même; c'est là une remarque intéressante, qui exprime pour les moteurs polyphasés une propriété semblable à celle découverte par M. Marcel Deprez pour les moteurs à courant continu. Cette loi est très sensiblement vérifiée par l'expérience, ainsi que le montrent, par exemple, les courbes de la figure 707, relevées par M. L. Bell sur un moteur triphasé de 12 chev. dont on maintenait l'effort résistant constant et dont on faisait varier

seulement la vitesse par addition de résistances variées dans les circuits induits. Le facteur de puissance et le courant dépensé varient extrêmement peu, tandis que la puissance mécanique et la vitesse varient proportionnellement de zéro à leurs maxima.

Si donc on rapporte sur une épure (fig. 708) les vitesses et efforts aux courants comme on l'a fait pour les moteurs à courant continu, la courbe de couple sera unique et les courbes de vitesse présenteront des ordonnées proportionnelles entre elles et inversement proportionnelles à la résistance totale secondaire. L'épure est analogue à celle qu'on obtient pour un moteur shunt à courant continu avec résistances insérées dans l'induit.

Ce tracé ou le précédent permet de déterminer les résistances du rhéostat

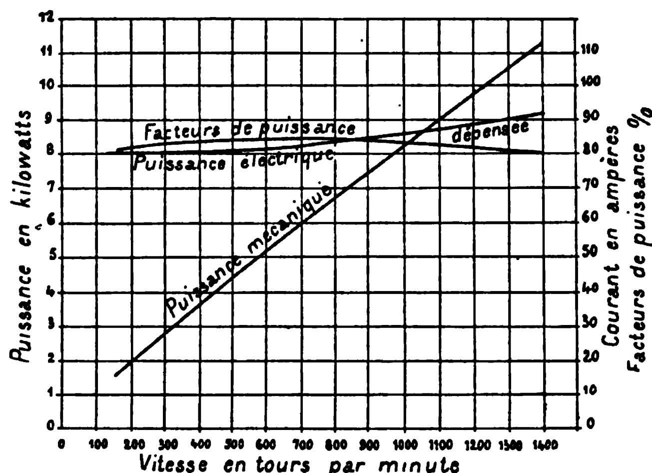


Fig. 707. — Variation de la puissance mécanique, du courant et du facteur de puissance d'un moteur triphasé de 12 chevaux fournissant à vitesse variable un effort moteur constant. Au lieu de « puissance électrique », lire « courant ».

au mieux de chaque application, d'une façon analogue à celle que nous avons indiquée pour les moteurs à courant continu (p. 130). On pourra, par exemple, choisir les échelons de manière à réaliser une série continue de vitesses pour un même effort, etc.

En général, comme on ne peut faire aucune économie de courant en ralentissant sur les rampes par ce procédé, puisque le courant est indépendant de la vitesse, on devra se borner à calculer le rhéostat en vue du démarrage et choisir les échelons de façon à produire l'accélération peu à peu sans sortir de deux limites de courant données ou tout au moins sans dépasser une certaine limite supérieure. La figure 708 représente cette série d'échelons dans le cas où le courant doit rester compris entre 63 et 90 ampères; on les obtient facilement de proche en proche d'après la courbe de vitesse sans rhéostat; du point de 63 amp. on passe au point de 90 amp. situé sur la même horizontale, et la nouvelle résistance R_2 est donnée en fonction de celle de l'induit r_2 par la relation

$$\frac{R_2 + r_2}{r_2} = \frac{g'}{g}.$$

Les rendements sont réduits dans la proportion inverse $\frac{g}{g'}$; ils décroissent donc très rapidement avec la vitesse.

Ce procédé de régulation est très simple et commode, parce qu'il permet de faire varier la vitesse aussi progressivement qu'on le désire sans couper le courant des circuits primaires; mais il est peu économique, à cause de l'énergie consommée en pure perte par le rhéostat. Il a, à ce point de vue, les mêmes incon-

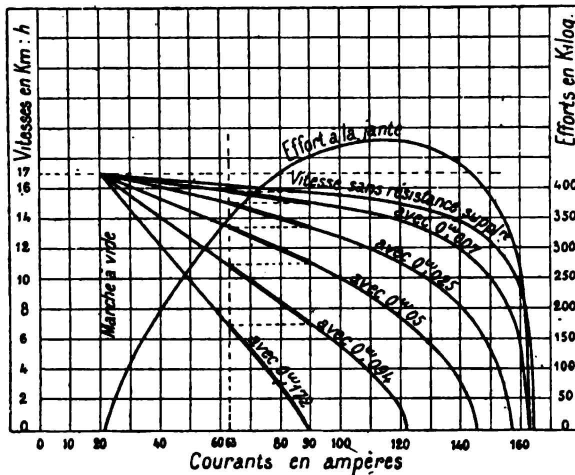


Fig. 708. — Fonctionnement d'un moteur polyphasé avec les mêmes résistances supplémentaires que dans la figure 706. Courbes rapportées aux intensités de courant.

vénients que l'ancienne méthode du rhéostat pour les moteurs à courant continu. Aussi doit-on le réserver pour les régimes temporaires tels que ceux qui accompagnent le démarrage et chercher pour la marche normale un mode de réglage qui n'entraîne pas ainsi de dépense d'énergie inutile.

On a proposé de modifier la méthode de variation du potentiel aux bornes indiquée plus haut (p. 300) en ajoutant à l'induit une résistance fixe suffisante pour rendre le couple maximum au démarrage. Comme, dans ces conditions, les ordonnées de la courbe de couple varient proportionnellement au carré du voltage aux bornes, on peut, en changeant celui-ci, déplacer le point de régime sur la courbe et par conséquent faire varier la vitesse. Mais ce système entraîne, par suite de la présence constante d'une résistance importante, une perte d'énergie tout à fait inadmissible en marche normale; la méthode de variation du potentiel doit donc être réservée au cas étudié plus haut.

2° Méthode de la commutation des pôles. — Un second procédé, qu'on peut employer dans le cas d'un ou de plusieurs moteurs, consiste dans la modification du nombre des pôles par commutation des enroulements.

Dans les enroulements en anneau, chaque bobine n'occupant qu'une encoche, on peut modifier la distance entre les encoches parcourues par un même courant à l'aide de simples commutations de bobine. La figure 710 donne un exemple de ces commutations,

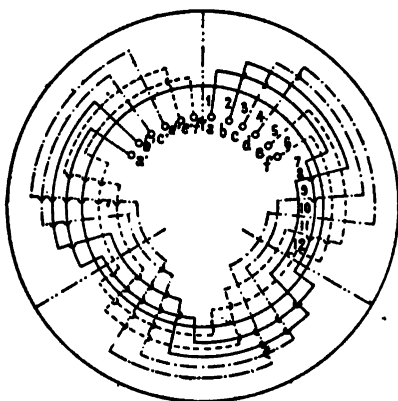


Fig. 709. — Schéma des connexions entre les sections d'un moteur triphasé en anneau à 36 encoches pouvant à volonté fonctionner comme moteur à 3 ou à 6 pôles.

a, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, bornes d'entrée des 6 circuits.
a', *b'*, *c'*, *d'*, *e'*, *f'*, bornes de sortie.
Les bobines annulaires ne sont pas représentées, mais les lignes radiales indiquent la position de leurs encoches le long de l'entrefer.

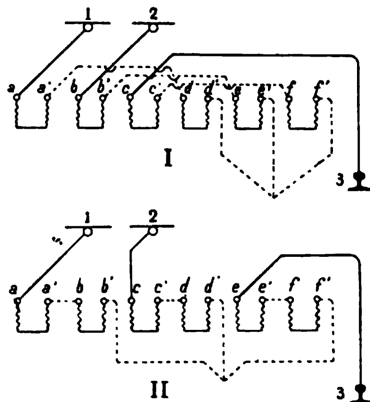


Fig. 710. — Schéma des commutations de circuit permettant de faire varier du simple au double le nombre des pôles du moteur triphasé de la figure précédente.

dans le cas où l'on veut simplement faire varier le nombre de pôles du simple au double, pour un moteur triphasé à 3 pôles dont le bobinage est représenté par la figure 709. On établit ce moteur pour le plus petit nombre de pôles avec 6 circuits de phases par champ, *aa'*, *bb'*, *cc'*, *dd'*, *ee'* et *ff'*; en groupant autrement ces 6 circuits, que nous avons numérotés dans l'ordre où ils se suivent le long de l'entrefer, de façon à réaliser un moteur à 3 phases par champ, on double le nombre des pôles.

Plus généralement, le moteur à 72 encoches choisi plus haut (t. I, p. 246) comme exemple pourrait être transformé en moteur à 8, 6 ou 4 pôles, en admettant dans le premier cas 3 encoches au lieu

de 2 par phase, dans le second cas 4 et dans le troisième 6. On obtiendrait ainsi, pour 8 pôles par exemple, le bobinage suivant :

BOBINAGE A 8 PÔLES

1er circuit.	2e circuit.	3e circuit.
+ 1	+ 4	+ 7
+ 2	+ 5	+ 8
+ 3	+ 6	+ 9
— 10	— 13	— 16
— 11	— 14	— 17
— 12	— 15	— 18
+ 19	+ 22	+ 25
+ 20	+ 23	+ 26
+ 21	+ 24	+ 27
— 28	— 31	— 34
— 29	— 32	— 35
— 30	— 33	— 36
etc.	etc.	etc.

Mais ces changements sont trop compliqués, ils nécessitent la subdivision des enroulements en un grand nombre de circuits, et l'on ne peut pratiquement songer à faire autre chose que le dédoublement des pôles. D'ailleurs, ces modifications ne sont possibles qu'avec des moteurs *en anneau;* dans l'enroulement en tambour, les deux encoches de même rang dans deux pôles consécutifs faisant partie d'une même bobine ne peuvent être rendues indépendantes.

Cette commutation de circuits, par le fait qu'elle change le nombre des pôles, modifie la surface de ceux-ci et, par suite, l'induction $\mathfrak{B}$ dans les noyaux de fer. Quand on passe de 12 pôles à 6, par exemple, ce qui double la vitesse, on réduit l'induction sensiblement de moitié[1].

3° Méthode du changement de fréquence. — On peut arriver à un résultat équivalent, sans modifier les circuits, en changeant la fréquence, c'est-à-dire le nombre de périodes par seconde des courants polyphasés qui alimentent la ligne. Il est évident qu'on ne peut songer à modifier la fréquence aux divers instants, ni à

[1] Le coefficient K varie un peu de son côté avec le nombre d'encoches par pôle.

employer à la station génératrice un grand nombre d'alternateurs différents ; mais il serait parfaitement admissible pour les réseaux semi-urbains, où il est nécessaire d'avoir deux vitesses, d'employer deux groupes d'alternateurs, avec deux fréquences différentes, alimentant l'un la partie urbaine du réseau, l'autre la partie suburbaine. De même, pour réduire la consommation d'énergie sur les rampes, on pourrait alimenter les tronçons de ligne afférents à celles-ci par des courants de fréquence plus basse que sur le reste du parcours.

L'augmentation de fréquence entraîne pour le moteur une réduction inverse du flux ; en doublant la fréquence, ce qui double la vitesse, on réduit l'induction de moitié. Il est bon de tenir compte de cette remarque pour le choix des inductions à adopter dans le calcul des moteurs à deux vitesses.

4° Méthode du groupement en « cascade » ou « tandem ». —

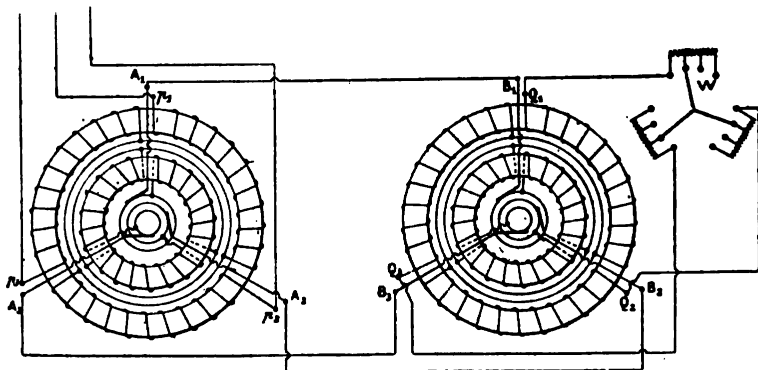


Fig. 711. — Schéma de la disposition de deux moteurs triphasés groupés en cascade (méthode Siemens et Halske).

Lorsque l'équipement comporte deux moteurs, on dispose d'une autre méthode ingénieuse, due à M. *Goerges*, de la maison *Siemens et Halske*[1], et qui donne des résultats équivalents à ceux de la méthode série-parallèle en courant continu : on place les deux moteurs en parallèle à la vitesse normale ; pour réaliser la vitesse réduite, on alimente (fig. 711) l'inducteur mobile du second B_1 B_2 B_3 par les courants de l'induit, également mobile, du premier A_1 A_2 A_3, qui

[1] Cf. Procédé Siemens et Halske pour le couplage des moteurs asynchrones, M. F. Guilbert, *Lumière Électrique*, 6 janvier 1894.

reste seul alimenté par le réseau ; on fait varier la vitesse par un rhéostat W, intercalé dans l'induit du second moteur, qui est fixe.

Dans ces conditions, si l'on appelle $2p$ le nombre des pôles des moteurs, n_0 la vitesse du synchronisme du premier moteur et g_1 le glissement de celui-ci, la vitesse de son induit sera

$$(1 - g_1)\, n_0$$

et la fréquence des courants qui s'y produisent

$$g_1\, p\, n_0.$$

Soit g_2 le glissement du second moteur ; sa vitesse sera de même

$$(1 - g_2) \times (g_1 n_0).$$

Les deux essieux tournant à la même vitesse, on aura nécessairement l'égalité

$$(1 - g_1) = (1 - g_2)\, g_1,$$

d'où

$$g_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \frac{g_2}{2}}, \tag{85}$$

et, comme g_2 ne dépasse ordinairement pas 4 à 5 p. 100, g_1 est sensiblement égal à $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire que les deux moteurs marchent sensiblement à demi-vitesse.

Pour appliquer cette solution utilement, il faut partager la charge entre les deux moteurs et faire en sorte, à cet effet, que leurs flux inducteurs restent égaux : on obtiendra sensiblement ce résultat en réduisant la force électromotrice aux bornes du second proportionnellement à la fréquence, c'est-à-dire en la faisant égale à la moitié de la tension du réseau. Les enroulements induits du premier moteur devront donc être calculés en vue de donner cette force électromotrice à demi-vitesse.

Lorsque les moteurs sont ainsi couplés, la perte du premier n'est plus proportionnelle au glissement g_1, comme dans le cas du moteur ordinaire (p. 284), parce que l'énergie consommée dans son induit par glissement est utilisée presque entièrement pour actionner le second moteur. On réalise donc de cette façon un régime économique, presque aussi avantageux que le régime

ordinaire. Les moteurs sont seulement un peu plus lourds à puissance égale, à cause du plus petit nombre de pôles tournants (t. I, p. 159) ; mais cette différence est peu importante et elle est bien compensée pratiquement par la réduction des fuites magnétiques que procure la réduction de la fréquence (t. I, p. 255). On peut utiliser cette remarque pour construire des équipements à deux moteurs fonctionnant constamment en cascade et donner à ceux-ci un entrefer plus considérable, tout en conservant un bon facteur de puissance. Cette solution nous paraît le meilleur moyen de concilier les exigences contradictoires de l'économie d'établissement, qui nécessite une fréquence élevée, et du bon fonctionnement des moteurs, qui en demande une basse ; on pourrait, par exemple, alimenter des moteurs à 25 ou 30 périodes par seconde pour des courants de 50 ou 60 périodes. Mais il faut alors renoncer à réaliser les variations de vitesse autrement que par rhéostat.

Si, tout en conservant le groupement des moteurs en cascade, on ajoute des résistances dans l'induit du second, on augmente le glissement g_2 et par suite g_1, et l'on peut ainsi réduire la vitesse jusqu'à zéro, au prix d'une perte d'énergie.

Il va sans dire que toutes les méthodes précédentes peuvent être utilement combinées entre elles ; mais on risque de tomber alors dans une complication de commutateurs assez gênante.

La figure 712 montre, à titre d'exemple, les courbes de fonctionnement obtenues par la General Electric Co. sur un équipement à deux moteurs donnant chacun 400 kg. d'effort de traction et équivalents aux moteurs G. E. 800 à courant continu. Le voltage était de 110 volts entre lignes ; un régulateur spécial donnait le moyen d'introduire des résistances dans l'induit et de réaliser trois connexions différentes des enroulements, l'étoile et le triangle avec moteurs en parallèle pour réaliser la petite et la grande puissance à la vitesse normale, et la connexion en cascade pour réaliser la demi-vitesse. Les rendements comprennent toutes les pertes, même celles des engrenages. L'effort de traction est, comme on le voit, toujours plus que suffisant, et les vitesses sont presque constantes. Dans le couplage en cascade à demi-vitesse, l'effort de traction atteint 400 kg. pour l'ensemble de l'équipement ; à pleine vitesse, il dépasse 1 400 kg. ; enfin, un commutateur qui

change les connexions de l'inducteur permet d'atteindre 4 000 kg. La régulation de vitesse entre les différents couplages était effectuée par rhéostat. Le résultat obtenu n'est pas tout à fait aussi satisfaisant qu'avec les moteurs à courant continu, qui donnent quatre vitesses économiques au lieu de deux ; il est notamment insuffisant sur les tramways; mais sur les chemins de fer deux vitesses sont bien suffisantes.

Démarrage. — Quelle que soit la méthode employée pour le

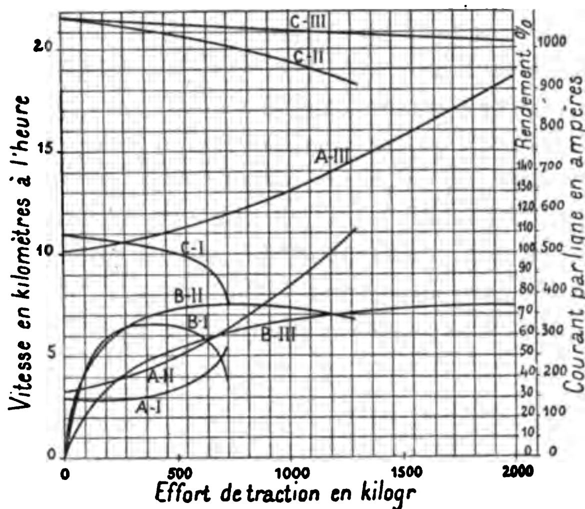


Fig. 712. — Courbes de fonctionnement réalisées par un équipement à deux moteurs polyphasés de la General Electric Co.

A, courants ; B, rendements ; C, vitesses. — I, groupement en cascade ; II, groupement en parallèle étoilé ; III, groupement en parallèle en triangle.

réglage de la vitesse, il faut, pour obtenir le bon démarrage d'une voiture, c'est-à-dire un couple élevé sans dépense exagérée de courant à la vitesse zéro, recourir à l'emploi du rhéostat d'induit. Cette remarque résulte de la simple inspection de la figure 708, qui donne en même temps la valeur $R_2 = 0{,}094$ ohm nécessaire dans l'exemple choisi pour réaliser le couple maximum à vitesse nulle.

Si le courant correspondant à ce couple maximum C_m peut être supporté par les circuits inducteurs, au moins temporairement, il convient d'adopter comme résistance au démarrage cette valeur R_2 qui fait correspondre le couple C_m au régime de l'arrêt ($g = 1$).

En appelant g_m le glissement correspondant au couple maximum sans rhéostat, relevé expérimentalement, la résistance de démarrage minima R_2 sera donc donnée par la relation

$$\frac{R_2 + r_2}{r_2} = \frac{1}{g_m},$$

d'où

$$R_2 = r_2 \left(\frac{1}{g_m} - 1\right). \tag{86}$$

Si le courant ainsi réalisé est trop fort pour la section du fil inducteur, on le réduira en augmentant la résistance jusqu'à ce que l'intensité ainsi réduite soit acceptable ; on sera sûr d'avoir de la sorte le couple maximum réalisable au potentiel considéré[1].

Au contraire, si l'on peut faire varier le potentiel aux bornes par un survolteur ou, ce qui revient au même, accroître le champ inducteur par commutation, on doit chercher à réaliser non seulement le courant maximum supportable, mais encore le couple maximum réalisable avec un courant donné (constant). D'après la formule de la page 296, ce couple s'obtiendra en faisant $\zeta = 1$, ou ici

$$\frac{\Omega\lambda_2}{R_2 + r_2} = 1,$$

ce qui donne une autre valeur de R_2, plus grande ordinairement que celle trouvée dans la première hypothèse.

Régulateurs. — Les régulateurs ou commutateurs destinés à réaliser les diverses combinaisons de circuits et de résistances peuvent être construits d'après les mêmes principes que ceux étudiés pour les équipements à courant continu ; les combinaisons seules diffèrent et sont plus compliquées. Par contre, les ruptures de circuit sont beaucoup moins destructives, à cause de la self-induction plus faible et des tensions plus réduites adoptées pour les courants alternatifs (par raison de sécurité pour les personnes). Il est, du reste, facile d'éviter complètement la formation

[1] Quelques auteurs ont proposé, pour simplifier le démarrage, de laisser constamment en circuit une résistance suffisante ; mais on réduirait ainsi le rendement d'une manière déplorable, on produirait un échauffement exagéré du moteur et enfin on perdrait la possibilité de régler à volonté la vitesse.

d'arcs en employant pour les frotteurs et les bagues certains métaux, tels que le zinc, l'antimoine, leurs alliages, etc., entre lesquels, comme l'a démontré M. Wurts, un arc à courants alternatifs ne peut se maintenir. L'emploi de contacts en charbon, suivant le procédé Siemens et Halske, donne aussi de bons résultats.

La construction des régulateurs est donc facile, sans qu'il soit besoin d'employer le soufflage magnétique. Celui-ci serait du reste moins efficace avec les courants alternatifs qu'avec le courant continu[1].

La figure 713 donne un exemple de la régulation la plus simple, celle par rhéostat, appliquée à la locomotive de mines de la Société Alsacienne citée

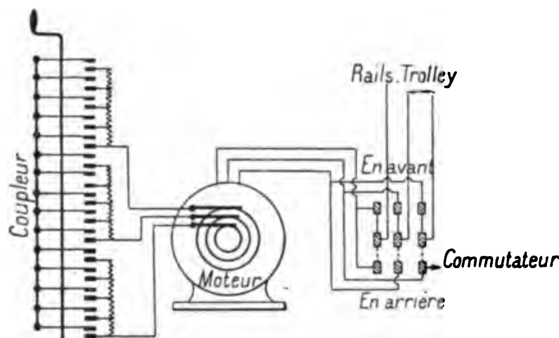


Fig. 713. — Régulation de la locomotive de mines triphasée de la Société Alsacienne.

plus haut (t. I, p. 524). Le régulateur proprement dit est construit suivant le système de leviers à cames déjà décrit (p. 248) et intercale à la fois trois séries de résistances variables. L'inverseur séparé qu'on voit à droite est établi d'après les principes que nous exposons ci-dessous.

La régulation des voitures du tramway de Lugano est analogue.

Comme second exemple plus compliqué, nous citerons le régulateur « tandem-parallèle » récemment breveté par la General Electric Co. au nom de MM. W. B. Potter et F. E. Case[2], qui ont utilisé, sous ce nom, la combinaison en cascade de Siemens et Halske.

La figure 714 donne le développement des deux cylindres et la disposition des interrupteurs de mise hors circuit placés au-dessous. La figure 715 indique schématiquement les différentes combinaisons réalisées dans les sept positions

[1] Il faudrait avoir soin, en tout cas, d'alimenter l'électro-aimant par les courants alternatifs de façon que les arcs soient toujours soufflés dans une seule et même direction.

[2] Brevet américain, 1896, et *Éclairage Électrique*, 31 juillet 1897.

du cylindre principal qui règle la vitesse. On retrouvera facilement ces combinaisons en suivant la marche des courants dans les appareils : les trois premières touches réalisent les combinaisons en tandem en introduisant d'abord des résistances maxima dans l'induit du second moteur, puis les réduisant et enfin les supprimant ; la quatrième position court-circuite le moteur M_2, en fermant l'induit de M_1 sur les demi-résistances ; on conserve ce montage de M_1 à la position 5, tout en mettant M_2 en court-circuit ; enfin, les positions 6 et 7 mettent les deux moteurs en parallèle en fermant d'abord leurs induits sur les demi-résistances également en parallèle, puis les mettant en court-circuit.

Ces groupements forment, comme on le voit, une série de combinaisons tout à fait analogues à celles des régulateurs série-parallèle à courant continu. Le

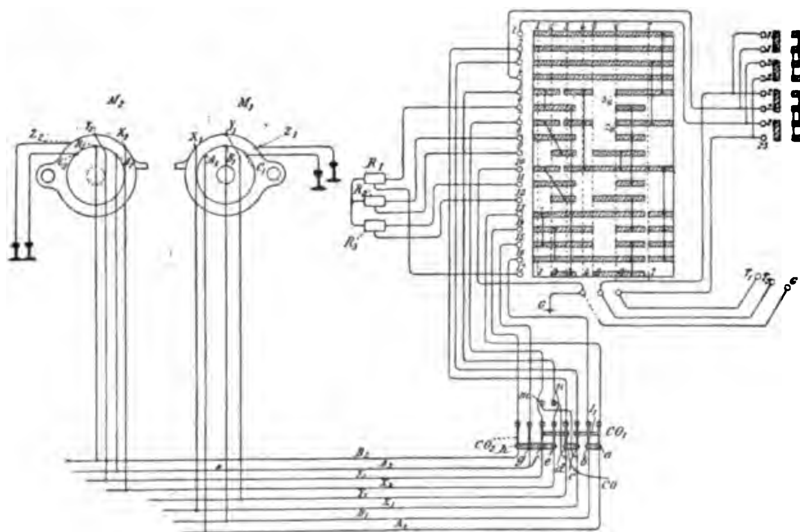


Fig. 714. — Régulateur tandem-parallèle pour équipement polyphasé Potter et Case. Développement du cylindre et schéma des circuits.

petit tableau de mise hors circuit placé sous le cylindre rappelle aussi les tableaux analogues placés dans ces régulateurs et répond au même but. Il comprend ici deux interrupteurs bipolaires *ab*, *cd* séparés, et deux autres interrupteurs bipolaires *ef*, *gh* accouplés ensemble, dont l'un peut se fermer par renversement sur les contacts *m*, *n*.

Les leviers *ab* et *gf* portent à mi-longueur une barre en matière isolante qui soulève l'interrupteur bipolaire central lorsqu'on ouvre l'un ou l'autre de ses deux voisins. En manœuvrant l'interrupteur bipolaire de droite, on rompt ainsi tous les circuits du moteur M_1 ; en manœuvrant les quatre leviers de gauche, on rompt tous les circuits du moteur M_2 en même temps que les circuits extérieurs fixes du moteur M_1 ; dans le premier cas, le moteur M_2 ne recevra aucun courant sur les cinq premières touches ; dans le second, M_1 restera de même hors circuit jusqu'à la sixième touche exclusivement.

Le cylindre de droite produit l'inversion de marche par commutation des circuits inducteurs, comme on va le voir.

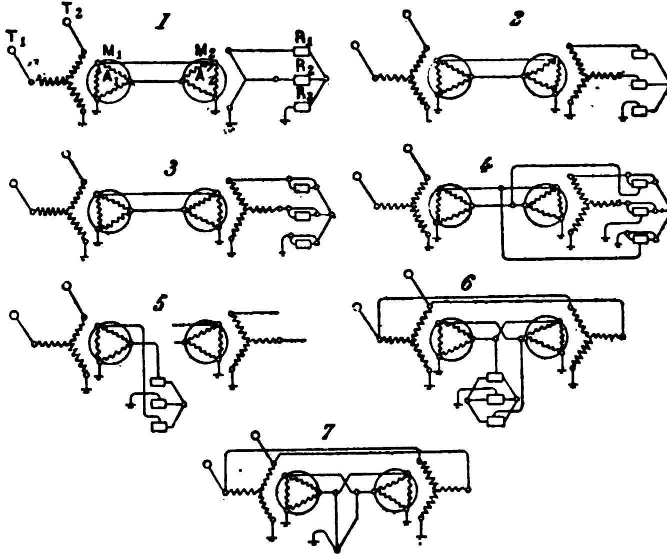


Fig. 715. — Régulateur Potter et Case. — Schéma des combinaisons réalisées.

Inversion de marche. — L'inversion de marche s'obtient pour les moteurs diphasés en renversant le courant dans l'une des phases ; cette manœuvre a pour effet de changer un retard d'un

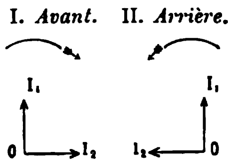


Fig. 716. — Changement de phase nécessaire pour inverser le sens du champ tournant d'un moteur diphasé.

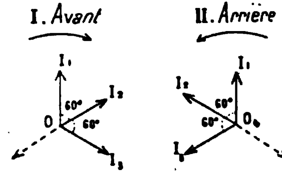


Fig. 717. — Changement de phase nécessaire pour inverser le sens du champ tournant d'un moteur triphasé.

quart de période en une avance égale et, par suite, renverse le sens de rotation du champ tournant (fig. 716). Elle peut être réalisée par un inverseur ordinaire.

Dans les moteurs triphasés, où les trois phases se suivent avec deux intervalles de $\frac{1}{6}$ de période, il suffit d'intervertir le courant de deux phases consécutives, suivant le schéma de la

figure 717. La figure 718 représente un inverseur disposé pour produire ce résultat.

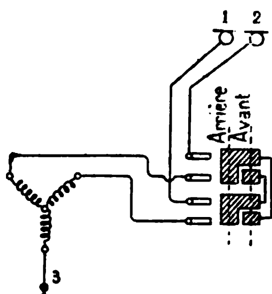


Fig. 718. — Schéma d'un appareil de changement de marche pour moteurs triphasés, analogue aux inverseurs cylindriques des moteurs à courant continu.

Récupération. — Comme la théorie exposée plus haut l'indique, lorsque les moteurs polyphasés tournent plus vite que la vitesse du synchronisme, ils agissent comme génératrices en débitant sur le réseau du courant qui peut être utilisé. Le graphique de la figure 719, qui complète celui de la figure 690, rend compte de ce fait signalé d'abord par MM. Leblanc et Hutin ; les points qui correspondent à ces régimes sont, sur l'épure de la figure 695, ceux du demi-cercle situé au-dessous de la ligne OM, tandis

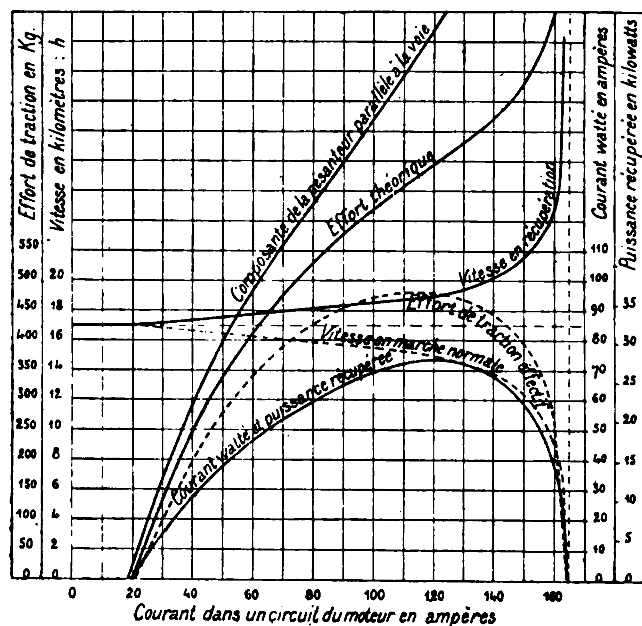


Fig. 719. — Etude graphique de la marche en récupération.

Traits pointillés : régimes normaux. — Traits pleins : régimes de récupération.

que les régimes ordinaires sont représentés par le demi-cercle supérieur ; le courant magnétisant continue à être fourni par le

réseau et la composante wattée change seule de signe. Les courbes de récupération tracées en traits pleins ont été déduites des courbes normales, tracées en pointillé, exactement d'après la même méthode que pour le moteur à courant continu (t. II, p. 179). La courbe de vitesse est symétrique de la première par rapport à l'horizontale du synchronisme. Quant à la courbe d'effort, elle s'obtient en reportant au-dessus de la courbe d'effort théorique les distances verticales entre celle-ci et la courbe d'effort moteur; la courbe d'effort théorique se déduit simplement de l'épure de la figure 695 (p. 297), qui ne tient compte ni des frottements ni des engrenages.

On voit, en définitive, que les moteurs polyphasés réalisent la récupération automatique du travail sur les pentes exactement comme les moteurs shunt à courant continu; mais, par suite du décalage de phase, cette récupération est bien plus faible que ne semble l'indiquer l'intensité du courant.

Freinage électrique. — Le moteur polyphasé peut faire office de frein lorsqu'on manœuvre l'inverseur, car le champ tournant étant alors inversé tend à arrêter la rotation de l'induit et même à faire tourner celui-ci en sens inverse. Mais, pour avoir un bon effet de freinage, il faudrait intercaler à chaque instant dans l'induit la résistance supplémentaire qui réaliserait le couple maximum pour la vitesse existant à cet instant ; on ne peut réaliser cette condition que fort imparfaitement en intercalant des résistances que l'on fait varier à la main.

Au moment de l'inversion, le glissement étant $2 - g$, la résistance R_2 devrait être telle que

$$\frac{R_2 + r_2}{r_2} = \frac{2 - g}{g_m},$$

d'où sensiblement, en négligeant g devant 2,

$$R_2 = \left(\frac{2}{g_m} - 1\right) r_2 \qquad (87)$$

ou approximativement

$$R_2 = \frac{2}{g_m} r_2.$$

Au moment de l'arrêt, cette résistance devrait atteindre la valeur indiquée plus haut pour le démarrage

$$R_2 = \left(\frac{1}{g_m} - 1\right) r_2 \qquad (88)$$

ou approximativement

$$R_2 = \frac{r_2}{g_m}.$$

Pendant le parcours d'arrêt, il faudrait donc déplacer la manette du rhéostat de façon à passer progressivement de la première valeur à la seconde. Mais il est plus pratique de déterminer par expérience la résistance moyenne unique la plus avantageuse ; elle différera peu de

$$\frac{5}{3}\frac{r_2}{g_m}.$$

L'effet de frein ainsi obtenu peut être accru en renforçant le champ à ce moment par les moyens indiqués plus haut.

Malgré cela, l'expérience montre que le freinage ainsi obtenu est beaucoup moins efficace que celui réalisé par les moteurs à courant continu. En outre, l'emploi de ce frein électrique suppose essentiellement que le moteur reste excité par des courants pris au réseau ; on ne peut donc se passer de ceux-ci, et, en cas de rupture du contact entre la voiture et la ligne, le frein électrique est sans action ; il est, par suite, indispensable d'avoir un autre système de frein rapide sur les voitures électriques à courants polyphasés.

C'est pourquoi MM. Brown, Boveri et Cie ont, par exemple, adapté à leurs locomotives de la Jungfrau (t. II, p. 54) un frein à ruban qu'un levier soulevé par un électro-aimant serre automatiquement dès qu'il est libéré par rupture du courant.

Les moteurs peuvent cependant être eux-mêmes employés comme freins au moyen d'un artifice qui consiste à rompre la communication des inducteurs avec le réseau et à les alimenter en courant continu par une petite batterie d'accumulateurs de force électromotrice appropriée ; ces moteurs deviennent alors de véritables alternateurs dont on ferme les induits sur des résistances graduées. Mais l'emploi de ce procédé est très délicat, à cause

de la très forte réaction d'induit d'un alternateur à si faible entrefer, et il est loin de présenter la même sécurité qu'avec les moteurs à courant continu[1].

Applications. — Le premier moteur triphasé pour tramways qui ait été mis en service est celui établi par la maison *Brown, Boveri et Cie* pour la ligne de Lugano, longue de 4,9 km. Les trucks, représentés par la figure 229 (t. I, p. 251), n'ont qu'un essieu moteur; les quatre voitures en service sont à 24 places chacune et pèsent 6,5 t. en charge, dont 4 pour la voiture non équipée; les rampes ne dépassent pas 6 p. 1000.

Le moteur, à 12 pôles, dont nous avons donné la description (t. I, p. 251), est représenté avec plus de précision par la figure 720. Les courants, à 40 périodes, sont transmis aux voitures par la voie et par deux fils de cuivre de 6 mm. espacés de 0,25 m.

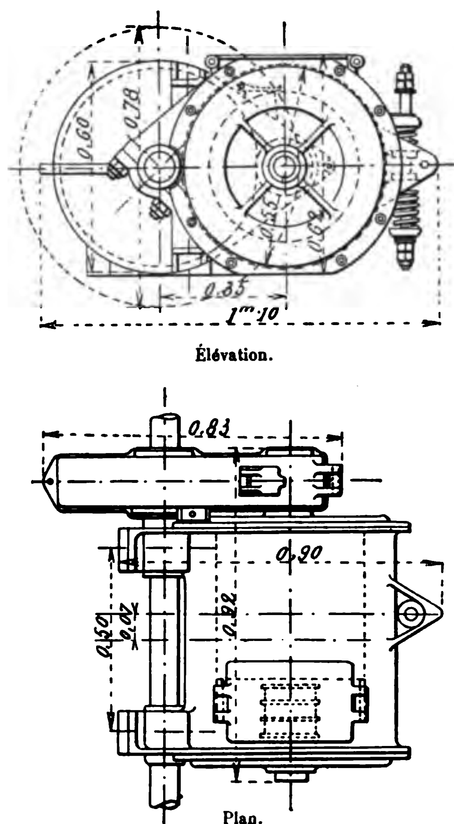


Fig. 720. — Moteur Brown-Boveri du tramway de Lugano.

Le régulateur, dont la figure 705 donne la vue extérieure, est formé de 3 rhéostats, dont les 3 manettes sont commandées par un même arbre au moyen d'une poulie sur laquelle s'enroulent des cordes de manœuvre actionnées des plates-formes ; c'est une disposition analogue à celle des anciennes voitures Thomson-Houston à rhéostat à touches.

Sur les locomotives construites plus récemment par la même maison (t. II, p. 52 et 53), les moteurs triphasés, logés sur le truck, ne diffèrent en rien des types employés pour les installations fixes;

[1] Si, en effet, on abaisse trop la résistance extérieure ajoutée à l'induit ou si l'on met celui-ci en court-circuit, l'alternomoteur ne consomme presque pas de puissance mécanique et ne joue plus le rôle de frein. Il faudrait donc faire varier cette résistance avec la vitesse pour se rapprocher de la condition de puissance maxima

$$2\pi n\, \lambda_2 = r_2,$$

en appelant n la fréquence $\frac{1}{T}$ des courants induits, laquelle décroît en même temps que la vitesse ; mais c'est peu pratique.

ils sont au nombre de deux, alimentés à 25 périodes et couplés en parallèle, et la régulation est faite par des rhéostats en étoile, placés au-dessus des moteurs dans une caisse horizontale et manœuvrés par une manette unique à la portée du mécanicien ; le même levier commande l'interrupteur de courants.

Au contraire, sur le chemin de fer de Varese, dont nous parlons plus loin (p. 332), les voitures comportent deux moteurs de 70 chev. chacun, montés sur le truck et alimentés à 45 périodes avec régulation tandem-parallèle.

Propriétés des moteurs à courants alternatifs simples au point de vue de la traction. — L'application des courants alternatifs simples à la traction, qui serait si désirable à tous égards, présente encore de sérieuses difficultés, que nous avons signalées déjà au chapitre V (t. I, p. 234). Nous ne dirons donc que quelques mots des propriétés de ces moteurs, pour donner à ceux que la question intéresse des éléments d'appréciation et de comparaison.

Moteurs asynchrones. — Les propriétés des moteurs asynchrones sont analogues à celles des moteurs polyphasés. En effet, le champ magnétique alternatif produit par un seul enroulement inducteur est équivalent, d'après un théorème de M. Leblanc, à deux champs magnétiques tournants de sens inverse : lorsque l'induit est au repos, les effets de ces deux champs s'annulent; mais, lorsque le moteur a été lancé à une vitesse voisine de sa vitesse de régime, l'un d'eux est annulé par la réaction d'induit et l'autre produit les mêmes effets que dans les moteurs polyphasés. Les mêmes formules restent donc applicables dans les limites ordinaires d'emploi, et les courbes caractéristiques présentent la même allure générale, avec cette différence que, les fuites magnétiques étant plus importantes relativement, le facteur de puissance est beaucoup plus faible[1].

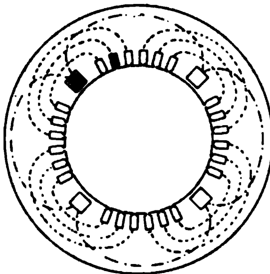


Fig. 721. — Principe du moteur Heyland à courants alternatifs simples, démarrant sous charge.

L'addition de résistances dans l'induit ne produit pas de couple de démarrage et il faut, par conséquent, pour faire démarrer ces moteurs, les alimenter momentanément par un second courant déphasé par rapport au premier et traversant un circuit spécial décalé d'un certain angle. Les procédés employés dans ce but ont été peu à peu simplifiés, en même temps que rendus plus efficaces, par divers inventeurs. En particulier, un récent dispositif, dû à M. *Heyland*[2] et que la figure 721 indique schématiquement, permet de réaliser un couple de démarrage supérieur au couple normal. La figure s'applique à un moteur tétrapolaire; les petites encoches ouvertes contiennent l'enroulement normal à courants alternatifs simples, formé de sections bobinées suivant les lignes pointillées ; un second enroulement en gros fil, décalé d'un

[1] Pour plus de détails, voir les mémoires de l'un de nous, cités plus haut (p. 290).

[2] *Verband der Deutschen Elektrotechniker*, session de juillet 1897.

demi-pôle (1/4 de période) par rapport au premier et indiqué en traits mixtes, est logé dans de grosses encoches fermées (une seule par pôle). Au moment du démarrage, on lance dans ce second enroulement un courant dérivé, qui se décale relativement au premier par l'effet des fuites magnétiques très grandes auxquelles il est soumis.

Le moteur se comporte ainsi comme un moteur polyphasé et, avec des résistances dans l'induit, il démarre sous charge. Mais, au moment du démarrage, le courant total est environ double du courant nécessaire pour obtenir le même couple en marche normale et le facteur de puissance s'abaisse à 60 p. 100. Malgré le progrès réalisé, ces conditions nous paraissent encore peu favorables à l'emploi des moteurs asynchrones simples pour la traction. L'avenir amènera sans doute de nouveaux et plus décisifs perfectionnements.

Moteurs synchrones. — Un moteur synchrone n'est autre chose qu'une génératrice fonctionnant en réceptrice à la même fréquence que la génératrice. Si l'on suppose le démarrage effectué au moyen d'accumulateurs, comme on le verra plus loin (p. 334), et le synchronisme atteint, un moteur synchrone bien établi, c'est-à-dire présentant une réaction d'induit très faible, peut fort bien supporter des variations de charge importantes sans se désynchroniser. La phase relative de sa force électromotrice par rapport à celle du réseau varie seule; sans entrer dans le détail des propriétés de ces moteurs, dont l'un de nous a donné ailleurs un exposé complet[1], il nous suffira de dire que la loi de variation du couple en fonction de la phase donne lieu à une courbe analogue à la courbe de couple de la figure 691, où l'on supposera que les abscisses représentent la différence de phase de la réceptrice par rapport à la génératrice; la différence de phase correspondant au maximum de la puissance est en général voisine d'un quart de période.

Ces moteurs n'ont pas été essayés jusqu'ici pour la traction; il est permis de supposer que la force vive considérable emmagasinée dans une automobile ou un train en mouvement amortirait suffisamment les variations de vitesse au moment de l'attaque d'une rampe pour qu'il n'y ait pas désynchronisation; mais l'expérience seule pourrait donner un renseignement précis à cet égard.

Avantages et inconvénients des moteurs polyphasés comparés aux moteurs à courant continu. — Nous pouvons compléter maintenant les remarques faites plus haut sur les avantages et les inconvénients des moteurs à champ tournant.

Les critiques ou objections que l'on adresse ordinairement à la traction par courants polyphasés s'appliquent les unes au mode de distribution, qui exige forcément trois conducteurs, dont deux au moins différents des rails, les autres aux propriétés particulières des moteurs; ce sont ces dernières que nous considérerons plus spécialement ici.

[1] *Les moteurs synchrones*, par A. Blondel, Paris, 1895.

Comme on l'a vu au chapitre V, les moteurs polyphasés sont à peu près équivalents comme poids spécifique et comme rendement aux moteurs à courant continu.

Le principal reproche qu'on leur a adressé est l'insuffisance alléguée de leur couple de démarrage par rapport au couple normal. Mais cette critique résulte d'un malentendu ; car elle s'applique seulement à l'hypothèse où l'on conserve même enroulement et même voltage d'alimentation qu'en régime normal. En effet, dans ces conditions, le couple, au lieu de croître plus rapidement que le courant comme dans un moteur à courant continu excité en série, varie plus lentement. En outre, si l'on veut se réserver une grande augmentation de l'effort de traction aux fortes charges et aux démarrages, il faut admettre en régime normal un courant *déwatté* considérable, dont les inconvénients sont très grands dans les distributions d'énergie. Il en résulte, en effet, que, pour produire une certaine puissance électrique effective, il faut une puissance apparente bien supérieure et un courant total plus fort, à voltage efficace égal, que s'il s'agissait d'un courant continu[1]. Un moteur polyphasé de 10 ou 12 pôles avec entrefer de 2 mm., fonctionnant dans ces conditions, ne peut guère dépasser aux charges moyennes un facteur de puissance de 0,75 ; le courant sera donc de $\left(\frac{1}{0,75} - 1\right) = 33$ p. 100 supérieur à la valeur nécessaire. Le décalage rendra l'effet de cette augmentation de courant encore plus sensible sur les alternateurs de la station génératrice, dont le voltage se trouvera très déprimé, et forcera de leur donner une puissance de production supérieure d'environ 50 p. 100 à la puis sance effective. D'ailleurs, comme on ne peut réduire la puissance consommée sur les rampes par une réduction de vitesse, ainsi qu'on le fait avec les autres moteurs (p. 102), cette puissance effective est elle-même plus grande qu'elle ne serait dans une installation à courant continu. Pour tous ces motifs, les frais d'établissement se trouveront considérablement accrus et pourront, pour des lignes à déclivités variées, réduire beaucoup l'économie du système.

Mais ces inconvénients peuvent heureusement être très réduits

[1] Cf. A. Blondel, Note sur le courant déwatté, présentée au *Congrès International des Électriciens* à Genève, août 1896.

par l'emploi de la méthode de variation d'excitation par changement de voltage ou de celle de commutation des inducteurs, décrites précédemment; ces dispositifs permettent, au prix d'une légère complication, de faire travailler les moteurs normalement avec une induction assez faible et un facteur de puissance de 0,80 à 0,85 pour un entrefer de 1 à 1,5 mm., tout en se réservant la possibilité de renforcer le champ magnétique lorsque cela est nécessaire.

L'accroissement de couple qui résulte d'un semblable renforcement, étant sensiblement proportionnel au carré du flux (p. 299), est même beaucoup plus important relativement que dans un moteur à courant continu à champ saturé.

Ainsi employés, les moteurs polyphasés n'exigent plus qu'un accroissement assez faible (25 à 35 p. 100) de la puissance des génératrices par rapport à celle d'une installation à courant continu. D'autre part, ils présentent pour une exploitation à vitesse constante les mêmes commodités que les moteurs à courant continu, en particulier l'auto-régulation de vitesse et la récupération automatique de l'énergie. Enfin, si l'on adopte le système du changement du nombre des pôles ou celui du groupement en cascade, qui permettent de réaliser deux vitesses différentes, un équipement polyphasé devient sensiblement équivalent à un équipement à deux moteurs shunt réglés par la méthode série-parallèle ; les démarrages obtenus à l'aide du rhéostat consomment de l'énergie inutilement, mais il en est de même pour les régimes correspondants des moteurs à courant continu dans la méthode série-parallèle.

Compris de cette façon, le moteur polyphasé est, nous le répétons, à peu près aussi léger et aussi peu encombrant qu'un moteur à courant continu [1], et présente un aussi bon rendement.

La construction des organes, sans être plus simple ni plus robuste, ainsi qu'on l'a dit quelquefois d'une manière intéressée et fort exagérée, peut être rendue aussi pratique, comme nous l'avons signalé (t. I, p. 242 et 249), par un choix convenable des dispositions. Les enroulements induits sont à basse tension ; il n'y

[1] Cette légèreté peut être d'autant plus grande qu'on n'est pas gêné ici par la réaction d'induit et qu'on peut, par conséquent, mettre peu de cuivre sur les inducteurs relativement à l'induit.

a lieu à l'emploi d'une haute tension que dans les enroulements inducteurs, qui peuvent être choisis fixes. L'emploi sur l'arbre de trois bagues qui ne demandent aucun entretien[1] et ne présentent pas d'usure sensible, au lieu d'un collecteur compliqué comme construction et comme isolement et coûteux d'entretien, constitue à l'actif des moteurs polyphasés un avantage pratique précieux[1].

Il est vrai qu'en cas d'accident aux inducteurs, le bobinage de ceux-ci est à refaire ; mais cette réparation est facile lorsqu'on emploie le bobinage Eickemeyer ou le bobinage à emboîtement (voir t. I, p. 244). Quant à l'induit, si on le bobine en barres massives, il n'exige aucune espèce de soins.

Si l'on excepte le cas des bobines brûlées, on peut donc dire que l'entretien des moteurs polyphasés se réduit à celui des coussinets. Mais ces derniers demandent une surveillance plus grande pour ces moteurs que pour ceux à courant continu ; car, ainsi qu'on l'a vu (p. 297), la condition essentielle pour leur bon fonctionnement est que l'entrefer soit très faible ; dans ces conditions, une usure de 1 mm. sur les coussinets peut suffire à amener un grippement entre l'inducteur et l'induit. C'est là, à notre avis, un des plus sérieux obstacles à l'adoption des moteurs à champ tournant sur les grands réseaux de tramways, où l'entretien du matériel roulant doit être aussi réduit que possible.

Cas d'emploi des moteurs à courants alternatifs dans la traction électrique. — Les résultats pratiques obtenus sur le tramway de Lugano et le chemin de fer du Gornergrat prouvent que l'emploi du matériel polyphasé est possible dans des cas spéciaux favorables, et l'on doit féliciter MM. Brown, Boveri et Cie d'avoir réalisé cette démonstration sans se laisser arrêter par des critiques et des objections qui paraissaient, il y a peu de temps encore, irréfutables. Les indications qui précèdent montrent, d'autre part, que les moteurs polyphasés peuvent satis-

[1] On ne peut se passer de trois bagues sur les moteurs de traction, parce que, d'une part, les moyens proposés pour introduire des résistances fixes dans l'induit sont inapplicables aux moteurs placés sous une voiture et que, de l'autre, ils ne permettent pas une variation suffisamment graduée de la vitesse ; mais ces bagues ne constituent pas par elles-mêmes un organe délicat.

faire convenablement aux exigences techniques de la traction au point de vue du démarrage et de la régulation. L'emploi des courants alternatifs est d'ailleurs désirable pour réduire l'électrolyse des conduites souterraines.

Mais il ne faudrait pas pour autant, croyons-nous, se laisser entraîner à penser que le moteur polyphasé va remplacer dès aujourd'hui le moteur à courant continu dans les grandes installations de tramways urbains. Indépendamment des causes spéciales d'infériorité que nous venons de signaler, la nécessité de deux fils de trôlet pour la distribution du courant aux voitures, avec la complication de croisements et d'aiguillages qui en résulte, et la résistance qu'opposent au passage des courants alternatifs les rails en fer, par suite de phénomènes d'induction bien connus, constituent un obstacle si grand à l'adoption de ce matériel sur ces réseaux qu'on ne peut raisonnablement le recommander en pareil cas : l'expérience américaine a trop bien condamné la complication du double trôlet pour que le changement de moteur suffise à la faire revivre, et, d'ailleurs, le courant continu à 500 volts est, en général, bien suffisant pour ce genre d'application.

Un autre obstacle très grave réside dans les perturbations fort importantes que les courants alternatifs produisent dans les réseaux téléphoniques et qui exigent non seulement le doublement mais encore la mise en terre de tous les fils téléphoniques, comme on le verra à l'appendice n° 2. Dans la très petite installation de Lugano, les perturbations sont devenues supportables après le doublement des fils parce que les lignes téléphoniques n'ont que de courtes párties parallèles à la voie ; mais il n'en serait plus ainsi dans une grande ville. La nécessité de trois fils isolés ne permettrait l'emploi des courants polyphasés qu'à condition de les distribuer par *conduites souterraines* avec retour par les rails.

C'est surtout sous la forme monophasée que les courants alternatifs pourraient alors être employés dans les réseaux urbains quand on aura trouvé un moteur qui permette de les utiliser convenablement au démarrage, c'est-à-dire qui produise un bon couple sans demander un courant trop fort relativement au courant normal, ni décalé d'une façon trop sensible par rapport à la force électromotrice.

Il ne faut pas oublier, non plus, qu'à voltage égal les courants alternatifs sont beaucoup plus dangereux pour les personnes et les animaux que le courant continu. On ne pourrait donc, dans les villes, où l'on limite à 600 volts la force électromotrice d'un courant continu, accepter plus de 150 ou 200 volts en courants alternatifs[1]; c'est seulement sur les voies à plate-forme séparée qu'il serait possible de dépasser ces chiffres sans inconvénient.

Le champ d'action des moteurs alternatifs dans la traction électrique nous paraît donc devoir être limité jusqu'à nouvel ordre aux lignes situées hors des villes, en particulier aux lignes de chemin de fer à aiguillages et croisements peu nombreux et à trafic peu variable[2]. L'emploi direct des courants polyphasés est alors très facile et présente un réel intérêt économique : on a trouvé, par exemple, dans un projet comparatif dressé pour la ligne de la Jungfrau[3], que les frais totaux d'installation s'élèveraient à 3160 fr. par cheval avec le courant continu et à 2 030 francs avec les courants triphasés à 5 700 volts primaires.

Sur les chemins de fer à plate-forme séparée, les trois courants peuvent être distribués aisément par trois rails ou conducteurs isolés alimentés par des transformateurs rapprochés; les moteurs, tournant plus vite, peuvent réaliser des valeurs de rendement et de facteur de puissance plus élevées; enfin, lorsque la traction se fait par des locomotives, où les moteurs placés au-dessus du truck sont faciles à surveiller et travaillent dans les mêmes conditions que dans une installation fixe, le problème de leur entretien et de leur régulation est résolu de lui-même et ne peut faire naître d'hésitation. Aussi, enhardis par leurs premiers succès, MM. Brown, Boveri et Cie ont-ils entrepris l'installation, d'après le même système, de deux nouvelles lignes allant l'une de Stansstadt à Edelberg, l'autre de Burgdorf à Thun. La première a environ 29 km. de longueur avec des déclivités assez faibles pour permettre la traction par simple adhérence; la seconde n'aura pas moins de 35 km., dont plus de 2 km. présentant des rampes supérieures à 25 p. 100, et sera exploitée par des locomotives à crémaillère analogues à celles de la Jungfrau.

La Compagnie Thomson-Houston de son côté, sans avoir encore établi de ligne de ce genre en Amérique où l'on tient aux matériels « standardisés », vient d'en installer une en Italie : le chemin de fer d'intérêt local de Varese, ali-

[1] L'arrêté réglementaire du 15 septembre 1893 n'admet même que 120 volts.

[2] Il est à remarquer, en effet, que l'écartement et la puissance individuelle des transformateurs limitent la puissance disponible sur les conducteurs (secondaires) de travail et que, pour ce motif, ce mode de distribution ne présente pas la même flexibilité que la distribution directe à courant continu. Par contre, il est plus facile d'accroître ultérieurement la capacité de la ligne en augmentant le nombre des transformateurs.

[3] Projet de MM. Wuest-Künz et L. Thormann.

menté par courants triphasés à 6 000 volts et 45 périodes, comprend deux tronçons, l'un d'environ 30 km. avec des rampes de 0, 045, et l'autre de 8 km. environ s'élevant à flanc de coteau avec de nombreuses courbes et une rampe continue de 0,06 à 0,0725 sur plus de 6 km.

Dans ces conditions, l'emploi des moteurs polyphasés est actuellement parfaitement rationnel.

Lorsqu'au contraire il s'agit d'un tramway urbain, cet emploi peut inspirer encore quelques inquiétudes et faire préférer la solution consistant à recourir à une transformation supplémentaire permettant d'employer sur la voie ferrée du courant continu avec le matériel ordinaire, qui a l'avantage d'être aujourd'hui très répandu et très perfectionné.

C'est à cette dernière méthode que s'en tient jusqu'ici la pratique américaine, bien que les grandes maisons de construction des États-Unis établissent aujourd'hui des moteurs polyphasés de premier ordre et aient fait de sérieux essais de traction à l'aide de ces moteurs. Tous les chemins de fer électriques d'intérêt local installés en Amérique dans le cours des dernières années ont un matériel à courant continu, alimenté soit directement, soit par des sous-stations où des commutatrices convertissent dans ce but les courants triphasés qu'elles reçoivent d'une ligne de distribution primaire. Comme exemples particulièrement importants de ce mode d'alimentation, nous pouvons citer les lignes de Portland, de Sacramento et Fresno, de Minneapolis-Saint-Paul, de Lowell-Nashua et des centres voisins des usines hydro-électriques du Niagara, en particulier celle de Niagara Falls-Buffalo. Une ligne nouvelle en construction de près de 100 km., dans l'Utah, sera alimentée de même. En Europe, on peut signaler déjà comme application de ce procédé la ligne suburbaine de Dublin-Dalkey, longue de 13 km., lestramways de Rome, Marseille (projet), etc.

Sur les chemins de fer métropolitains, les arrêts étant très fréquents et les démarrages devant être très rapides, cette méthode est la plus rationnelle. Aussi est-ce elle qui va être employée pour la nouvelle ligne métropolitaine de Londres, le Central London Railway ; cette ligne tubulaire, qui a 10,5 km de longueur, sera alimentée par une seule usine de 2 600 chevaux située à l'une des extrémités ; la distribution primaire sera faite en courants triphasés de 25 périodes à la tension de 5 000 volts, que 4 sous-stations réparties le long de la ligne transformeront en courant secondaire continu à 500 volts ; la faible hauteur du tunnel a forcé d'adopter, au lieu de voitures automobiles, des locomotives basses munies de 4 moteurs à commande directe ; chacune de ces locomotives pèsera 45 t., exercera un effort au crochet de 6 350 kg. et remorquera à la vitesse de 23,3 km : h. des trains de 7 voitures de 15 t. offrant en tout 336 places.

L'emploi des convertisseurs tournants présente, quoi qu'on fasse, un inconvénient sérieux, c'est la nécessité d'une surveillance et d'un graissage périodique, entraînant l'obligation de placer ces

appareils dans de véritables sous-stations, coûteuses de construction et d'exploitation. On obtiendrait bien, il est vrai, une très grande réduction de ces sujétions par l'emploi des remarquables convertisseurs Leblanc et Hutin, dans lesquels le collecteur est le seul organe mobile et le calage des balais est automatique, ce qui permet d'abandonner ces appareils à eux-mêmes pendant toute la journée ; mais il faudrait néanmoins aller les visiter et les mettre en train une fois par jour. Cet inconvénient ne disparaît complètement que si l'on accepte l'emploi des moteurs alternatifs, rendant possible l'adoption de transformateurs sans organes mobiles, qui peuvent être placés dans de simples boîtes ou dans des kiosques le long des voies desservies.

Équipements mixtes. — Au lieu d'effectuer cette conversion du courant dans des sous-stations, on peut la réaliser sur les voitures elles-mêmes. C'est

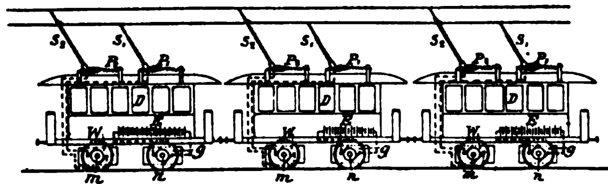


Fig. 722. — Train formé d'automobiles à équipement mixte pour courants alternatifs et courant continu.

ce que se sont proposé, par exemple, la maison *Siemens* et *Halske*[1] et, plus récemment, M. *Déri*[2]. Leur système consiste à donner à chaque automobile D (fig. 722) deux équipements complets montés sur des essieux différents et formés, l'un de deux moteurs à courants alternatifs W, l'autre de moteurs à courant continu *g* excités en dérivation, auxquels on adjoint une batterie d'accumulateurs E. Celle-ci sert à alimenter les moteurs à courant continu au démarrage (pendant lequel on met les moteurs alternatifs hors circuit) et sur les fortes rampes. Pendant le reste du temps, ce sont les moteurs à courants alternatifs qui produisent l'effort de traction normal, ainsi que l'effort supplémentaire nécessaire pour entraîner les moteurs à courant continu ; ceux-ci, travaillant alors en génératrices, rechargent la batterie : à cet effet, la f. é. m. des moteurs à courant continu à la vitesse normale, très voisine du synchronisme des moteurs à courants alternatifs, doit être celle qui convient pour charger les accumulateurs à leur courant normal de charge ; lorsque la batterie est complètement chargée, sa f. é. m. faisant équilibre à celle des moteurs, elle ne reçoit plus aucun courant ; mais, au moindre ralentissement, elle se décharge dans les moteurs et contribue ainsi à la traction, soit

[1] Brevet allemand du 6 mars 1897.

[2] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 5 août 1897.

partiellement, soit totalement. Ce dispositif permet de supprimer les aiguillages et les courbes sur la ligne de distribution, puisque la voiture peut se passer de courants alternatifs en ces points; on peut même dans les gares supprimer toute prise de courant.

Cet ingénieux procédé, qui, comme tous les systèmes à courants alternatifs, convient seulement aux lignes non urbaines, se prête à l'emploi des moteurs monophasés et constitue ainsi une solution intéressante du problème de la traction sur longs parcours. Mais il ne faut pas se dissimuler que l'adjonction d'une batterie d'accumulateurs et l'emploi d'un double équipement donnent lieu à une augmentation de poids et de prix qui nous paraissent prohibitives; en outre, la charge des accumulateurs par l'intermédiaire d'une transmission de ce genre est très peu économique, car, les pertes des deux moteurs et de leurs engrenages s'ajoutant, on ne peut guère compter recueillir dans la batterie que 50 à 60 p. 100 de l'énergie fournie au moteur alternatif, déduction faite de celle qui sert à la traction.

On trouverait, croyons-nous, sur les chemins de fer électriques à déclivités peu variées, une solution à la fois moins dispendieuse d'installation et de meilleur rendement dans l'emploi déjà signalé (t. I, p. 236) des moteurs à courant continu comme moteurs synchrones à courants alternatifs [1] en même temps que comme commutatrices à bon rendement pour la charge des accumulateurs; un interrupteur automatique, facile à imaginer, couperait de lui-même l'arrivée du courant alternatif dès que, par suite d'un ralentissement accidentel ou voulu, la vitesse tomberait au-dessous de celle qui correspond au synchronisme. Sur une locomotive électrique, la batterie d'accumulateurs pourrait même être remplacée, comme nous l'avons dit (t. I, p. 237), par un convertisseur tournant fournissant du courant continu seulement pendant les démarrages et par suite avec un faible échauffement relatif [2].

[1] En admettant pour les moteurs tétrapolaires une vitesse normale de 900 tours par minute, qui n'a rien d'exagéré sur un chemin de fer, ces moteurs pourraient être alimentés par des courants alternatifs à la fréquence de 30 périodes par seconde.

[2] Pour être complets, nous mentionnerons encore un curieux système de M. Leblanc, qui est en essai sur une automobile de la Compagnie du Nord, pour éviter les difficultés d'entretien des moteurs à courant continu par la transformation de ceux-ci en moteurs à champ tournant. A cet effet, chaque moteur comprend un induit extérieur fixe et un inducteur intérieur mobile, construit comme celui des dynamos Siemens à pôles intérieurs. Le collecteur, placé dans la cabine du mécanicien et entraîné par un petit moteur spécial à vitesse réglable, est construit comme celui d'une machine Gramme, mais chaque touche est réunie à une bague isolée placée sur le même arbre. De ces bagues partent des câbles réunis aux sections de l'induit. Lorsqu'on fait tourner le collecteur et qu'on l'alimente en courant continu par ses balais, il se produit donc dans l'induit un champ tournant qui entraîne l'inducteur synchroniquement. Nous n'insisterons pas sur ce système qui, malgré son extrême ingéniosité, ne nous paraît pas appelé à un avenir pratique par suite de sa trop grande complication et du nombre insuffisant de touches au collecteur qu'il permet.

CHAPITRE XII

CONDUITE, ENTRETIEN ET ESSAIS DES MOTEURS ET DU MATÉRIEL ROULANT

§ 1. — CONDUITE DES VOITURES

Les moteurs de traction des bons constructeurs laissent aujourd'hui peu de chose à désirer sous le rapport de la résistance et de la durée. Néanmoins, pour assurer leur bon fonctionnement et, plus généralement, celui de l'équipement électrique des voitures, il y a certaines précautions indispensables à prendre.

Les détails de construction varient d'ailleurs beaucoup trop d'une maison à l'autre, et même chez chaque fabricant au fur et à mesure des progrès de l'industrie, pour qu'on puisse donner relativement à ces précautions autre chose que des règles d'ordre tout à fait général. C'est à ces indications que nous nous bornerons ici, en renvoyant pour chaque matériel en particulier aux instructions de détail qui doivent être fournies par le constructeur en même temps que les appareils et dont nous reproduisons en appendice des exemples intéressants[1].

Visite préalable de l'équipement. — Avant de mettre une voiture électrique en service, il y a lieu de s'assurer que les moteurs sont en bon état et bien propres, d'enlever au besoin la graisse et la poussière qui peuvent y avoir pénétré, de vérifier si toutes les boîtes à graisse sont suffisamment garnies.

Il faudra ensuite, tous les huit jours au plus, vider complètement ces boîtes et les nettoyer à fond.

[1] Voir aussi la notice de MM. Hutchinson et Phillips sur le matériel Westinghouse, citée plus haut.

Les armatures, l'isolant et les inducteurs doivent de même être très régulièrement inspectés, ainsi que les organes de transmission. On veillera tout spécialement à la propreté de l'armature, du collecteur et des porte-balais, qui doivent être tenus bien secs; il n'est pas mauvais néanmoins d'enduire de temps à autre le collecteur d'une très petite quantité de vaseline ou de paraffine. Dès qu'un collecteur commence à s'user inégalement, le faire repasser au tour.

On examinera aussi si les balais sont en bonne condition et appuient bien sur le collecteur.

On s'assurera que tous les écrous et les vis sont en place et serrés à fond.

On vérifiera si les circuits de la voiture sont en bon état, si les connexions sont bien fixées, si l'isolement des càbles est intact, si les régulateurs, commutateurs et interrupteurs fonctionnent bien. Le parafoudre sera inspecté et nettoyé au moins une fois par semaine.

Toutes ces opérations doivent, bien entendu, se faire avec la perche du trôlet abaissée, c'est-à-dire sans courant. Du reste, les interrupteurs principaux doivent toujours être ouverts quand les voitures sont dans la remise.

On visitera enfin l'appareil de prise de courant et spécialement la roulette ou le frotteur; les paliers des roulettes doivent toujours être tenus bien propres et bien graissés. Si la voiture est neuve ou qu'elle soit restée longtemps au repos, éviter d'appuyer du premier coup le galet de contact directement contre le fil et toucher celui-ci d'abord avec le rebord du galet ; s'il se produit une étincelle, c'est que tout n'est pas en ordre; un interrupteur sera, par exemple, resté fermé.

Avant de mettre une voiture en service, soit après un montage neuf, soit après une réparation importante, il est bon de l'essayer comme il suit. Les connexions ayant été préalablement vérifiées au moyen d'une pile et d'une sonnerie, on isole d'abord l'un des moteurs. Puis on donne le courant, on ferme les interrupteurs et l'on manœuvre le régulateur, successivement en avant et en arrière : si les résultats obtenus correspondent aux indications portées sur le couvercle du régulateur, c'est que le moteur fonctionne norma-

lement ; dans le cas contraire, on intervertira les connexions d'induit ou d'inducteur. On essaie ensuite de même l'autre moteur, en isolant le premier. Cela fait, on met les deux moteurs en circuit et l'on manœuvre le régulateur successivement pour la marche en avant et pour la marche en arrière, qui doivent s'effectuer comme lorsque chaque moteur fonctionnait seul. Enfin, on essaie le frein électrique, s'il y a lieu. Quand la voiture comporte deux régulateurs, les essais doivent être faits séparément avec chacun d'eux ; s'ils ne donnaient pas des résultats identiques, c'est qu'il y aurait une erreur dans la désignation des diverses bornes ou dans les connexions des câbles et il conviendrait de la rechercher et de la corriger.

Chaque voiture doit être munie d'un certain nombre d'accessoires indispensables, notamment un tournevis, une clef anglaise, un maillet, une pince universelle, un assortiment de fils fusibles, des balais de rechange, une ou plusieurs lampes à incandescence de réserve, une lampe de secours à huile, etc.

Mise en marche. — Au moment de partir, le mécanicien doit, avant d'appuyer le trôlet contre le fil, s'assurer que les interrupteurs sont bien ouverts et les coupe-circuits fermés, que la manivelle du régulateur est au cran d'arrêt et l'inverseur de marche, s'il y en a un, dans la position voulue.

Pour démarrer, fermer les interrupteurs, amener la manivelle du régulateur en avant, d'un mouvement lent, mais continu, et sans hésitation, de façon à gagner la vitesse normale graduellement et non par à-coup : un démarrage trop brusque fatigue les engrenages ; d'autre part, un mouvement trop lent du régulateur occasionne des arcs qui peuvent brûler les contacts.

Si la voiture ne démarre pas, ramener la manivelle au zéro, visiter les interrupteurs et les coupe-circuits et examiner le contact des roues avec les rails, comme dans le cas d'un arrêt accidentel (voir plus loin : *Dérangements*). Il peut arriver aussi que l'un des moteurs se trouve hors circuit ; dans ce cas, le démarrage ne s'effectuera que sur la position de la manivelle qui met les moteurs en parallèle. Lorsque ce fait se produit, il est prudent d'isoler sans retard le moteur hors circuit, car, si l'un des câbles aboutis-

sant à ce moteur est rompu, il y a beaucoup de chances pour que l'extrémité devenue libre vienne toucher la carcasse du moteur ou le châssis et occasionne un court-circuit.

Quand les roues patinent, répandre du sable sur les rails, mais toujours en quantité modérée ; si cela ne suffit pas, faire revenir la manivelle du régulateur au zéro, puis l'amener de nouveau lentement en avant.

Arrêt. — Pour arrêter les moteurs, ramener vivement et régulièrement la manivelle au zéro, en ayant soin de ne pas dépasser ce cran ; il peut être avantageux, pour faciliter la rupture de l'arc, de passer brusquement de la touche 2 au zéro.

Ne jamais serrer les freins avant d'avoir coupé le courant. Immédiatement avant l'arrêt complet de la voiture, desserrer les freins pour mettre les dents d'engrenages en prise et permettre au démarrage suivant de s'opérer sans choc.

Autant que possible, éviter d'arrêter la voiture en courbe ou sur les fortes rampes, parce que l'effort considérable nécessaire pour démarrer ensuite peut exiger un courant exagéré.

Quand le mécanicien quitte sa voiture, ne fût-ce que pour un instant, il doit détacher la manivelle du régulateur, après l'avoir remise au zéro, et l'emporter avec lui.

Changement de marche. — Lorsqu'on change le sens de la marche, retourner aussi la perche du trôlet. Ne jamais marcher avec la perche inclinée en avant, sauf en cas d'extrême urgence, et alors très doucement, en faisant surveiller le trôlet par le receveur qui devra en tenir la corde de commande à la main.

Si la voiture est munie d'un inverseur de marche qui ne soit pas enclenché avec le régulateur, avoir toujours soin de couper le courant avant de manœuvrer cet appareil.

Ne jamais renverser le sens de la marche pendant que la voiture est en mouvement, par crainte de la dépense exagérée de courant qui en résulterait (voir p. 181), sauf en cas de nécessité absolue pour éviter un accident grave et quand la voiture n'a pas de frein électrique. Dans ce cas, si l'on a le temps, ramener la manivelle à zéro, serrer rapidement les freins, puis les desserrer, inverser

le courant et remettre la manivelle au 1er cran de marche (au 2e la voiture patinerait et au 3e les plombs sauteraient presque infailliblement) ; de toutes façons, couper le courant dès que la voiture s'arrête.

Ne jamais renverser le courant avec les freins serrés.

Précautions à prendre pendant la marche. — Marcher lentement dans les descentes, sur les parties de voie mauvaises ou couvertes d'eau, aux bifurcations, aux croisements et dans les courbes. Dans le cas où la prise de courant se fait par trôlet aérien, le receveur de la voiture devra veiller attentivement sur sa roulette au passage des courbes et des aiguillages ; il est même bon de couper le courant à la rencontre de ces derniers appareils. Éviter de passer sur des morceaux de bois ou de fer, des fils métalliques, des pavés ou autres obstructions susceptibles d'être heurtées par les moteurs.

Sur les pentes longues et fortes, le mécanicien doit rester bien maître de sa voiture et se tenir prêt à manœuvrer le frein de secours au cas où les freins ordinaires viendraient à manquer. On marchera, en général, avec les moteurs hors circuit. Dans les voitures qui ne sont pas munies de dispositifs de freinage par mise en court-circuit, on laissera toujours le trôlet sur le fil, afin de pouvoir, au besoin, freiner la voiture électriquement par inversion de marche en cas d'insuffisance des freins ordinaires. Sur les très fortes pentes, il peut être utile de faire fonctionner les moteurs sur l'un des premiers crans du régulateur pendant que les freins sont serrés, pour empêcher le blocage des roues ; c'est ce qu'on fait, par exemple, sur les grandes rampes de San Francisco ; mais il en résulte une dépense de courant inutile, qu'il est facile d'éviter par l'emploi de freins électriques prévenant le blocage (voir chap. XIV).

Quand deux voitures se croisent à un évitement, ne jamais les faire repartir ensemble.

Les mécaniciens doivent se familiariser le plus tôt possible avec les divers bruits que fait entendre leur voiture pendant la marche, afin de percevoir immédiatement tout bruit insolite, dénotant un dérangement des appareils.

En cas de déraillement du trôlet, ce dont on s'aperçoit par un léger ralentissement de la voiture, et, la nuit, par l'extinction des

lampes[1], abaisser aussitôt la perche, ramener vivement la manivelle du régulateur au zéro et arrêter la voiture, puis remettre le trôlet en place. Si l'on n'avait pas soin d'abaisser le trôlet, on risquerait d'arracher des parties de la ligne aérienne ou même le toit de la voiture.

Lorsque la voiture elle-même déraille, n'essayer de la remettre sur la voie avec l'aide des moteurs qu'après s'être assuré qu'il n'y a pas d'obstacle à son mouvement.

En cas d'orage, mettre les lampes en circuit.

Dérangements. — Aussitôt qu'on constate un dérangement, par exemple une marche saccadée des moteurs, le plus sûr est d'ouvrir l'interrupteur principal et même d'abaisser le trôlet, qu'on ne remettra en place qu'une fois que le trouble aura disparu. Celui-ci est généralement dû à un court-circuit ou à une mise à la terre.

Si le courant est interrompu sur la ligne, ce dont on s'aperçoit par l'arrêt simultané de toutes les voitures, ramener le régulateur au zéro, mettre les lampes en circuit, après avoir vérifié tous leurs filaments et avoir au besoin remplacé les lampes avariées, et attendre que le courant soit rétabli; à ce moment, les mécaniciens devront éviter de faire démarrer toutes leurs voitures ensemble.

Si une voiture s'arrête brusquement ou refuse de démarrer, sans que l'arrêt des autres indique un défaut de courant sur la ligne, s'assurer tout d'abord que le courant arrive bien au trôlet en essayant d'allumer les lampes; si elles s'allument, la faute doit provenir soit d'une rupture du circuit de la voiture, soit au contraire d'une mise à la terre par court-circuit.

1° Pour rechercher un court-circuit ou une dérivation à la terre, abaisser le trôlet et passer en revue tous les conducteurs, ainsi que les porte-balais, le régulateur et les parafoudres. Si la dérivation à la terre s'est produite dans l'un des moteurs, on localisera la faute en serrant les freins, mettant l'un des moteurs hors circuit et lançant graduellement le courant dans l'autre, en mettant la manivelle d'abord au 1er cran : si le fusible ne saute pas, c'est que le moteur mis hors circuit est bien celui qui a été avarié ; sinon le fusible saute.

On reconnait la formation d'un court-circuit dans une armature à ce qu'elle

[1] Sur certaines voitures, celles de Halle par exemple, la corde de manœuvre du trôlet est reliée à un timbre dont la sonnerie avertit le personnel que le trôlet a déraillé.

s'arrête brusquement ou se met à tourner d'une façon saccadée ; il se dégage en outre généralement une forte odeur de brûlé lorsqu'on ouvre la trappe de visite. Dans ce cas, mettre immédiatement le moteur avarié hors circuit par l'interrupteur du régulateur, après avoir ouvert l'interrupteur principal, et marcher avec un seul moteur.

De même, dès qu'un moteur donne soit des étincelles excessives, soit des signes quelconques de dérangement, le mettre de suite hors circuit.

2° Pour rechercher une rupture de courant dans le circuit d'une voiture, ramener les régulateurs au zéro et examiner les différents interrupteurs placés entre le trôlet et les moteurs; on en trouvera probablement un d'ouvert. Sinon, vérifier si les balais ne sont pas brisés et s'ils donnent un bon contact. Dans le cas de l'affirmative, on manœuvrera les deux régulateurs l'un après l'autre. Si l'un des deux fonctionne, c'est-à-dire met la voiture en marche, le trouble est probablement dû à un mauvais contact dans l'autre; dans ce cas, après avoir remis les deux régulateurs au cran d'arrêt, on ouvrira le couvercle du second pour visiter les contacts. Si aucun des deux régulateurs ne fonctionne, on examinera si l'un des fusibles n'a pas sauté. S'il en était ainsi, on ouvrirait l'interrupteur de sûreté et on remplacerait le plomb sauté par un nouveau fusible, et au besoin par deux plombs mis en parallèle, puis on essaierait de faire repartir la voiture; si les deux nouveaux plombs sautaient encore, il ne faudrait pas les remplacer par du fil de cuivre ou de fer, mais renoncer à réparer l'avarie en route. Si, au contraire, on trouve les fusibles en place, mettre les lampes en circuit : si elles s'allument, c'est que le trôlet et les fils de terre sont en bon état ; sinon, vérifier avec soin les circuits et surtout leurs connexions. Dans la première hypothèse, on tournera le régulateur de façon à lancer du courant dans les moteurs : si les lampes s'éteignent alors, le trouble est probablement dû à un mauvais contact avec le rail; dans ce cas, tâcher de nettoyer la surface du rail avec la barre de fer servant à faire les aiguilles, en l'introduisant en arrière de l'une des roues, ou bien rétablir le contact entre le rail et la roue au moyen d'un bout de fil isolé; les rails sur lesquels repose la voiture peuvent se trouver privés de courant; s'il en était ainsi, établir le contact avec l'un des rails adjacents; avoir soin de rompre le contact d'abord avec la roue, sous peine de recevoir un choc.

Après avoir épuisé sans succès tous ces moyens, il ne reste plus qu'à attendre la voiture suivante pour se faire pousser par elle jusqu'à la remise.

Nous indiquons plus loin au § 3 (p. 380) les méthodes d'essai rapide qui permettent alors de retrouver les défauts ayant occasionné les dérangements constatés. Quelques-unes de ces méthodes peuvent être appliquées par les mécaniciens eux-mêmes, par exemple la recherche des défauts d'isolement ou des ruptures de circuit à l'aide d'une sonnerie.

Il est recommandé aux agents de prendre les plus grandes précautions pour l'inspection des moteurs. Par les temps de pluie,

ils doivent s'arranger de manière qu'il ne puisse dégoutter d'eau de leurs vêtements ou de leur casquette sur les moteurs; ils doivent aussi veiller à ne pas laisser tomber d'objet de leurs poches et à ne pas oublier d'outil au fond de l'enveloppe. Quand ils inspectent les moteurs pendant la marche, il faut qu'ils se tournent face en arrière, de façon à ne pas risquer de tomber dans l'ouverture de la trappe, en cas d'arrêt subit de la voiture. Ils doivent avoir soin également de ne jamais toucher les bornes d'un moteur ou d'un régulateur avec un objet métallique, une burette à huile par exemple, à moins que le trôlet ne soit abaissé.

Toutes les fois qu'on remplace un fusible, il est prudent d'abaisser le trôlet; c'est là le plus sûr moyen d'isoler la voiture. Néanmoins, pour gagner du temps, les mécaniciens se contentent souvent d'ouvrir leur interrupteur.

§ 2. — Entretien et réparations

Les moteurs employés pour la traction demandent à être particulièrement bien entretenus et doivent être soumis à de fréquentes vérifications. Sur un réseau de tramways bien ordonné, chaque moteur doit être démonté réglementairement au moins une fois toutes les six semaines, ou mieux tous les mois, et visité avec soin. Ce démontage exige certaines manipulations spéciales sur lesquelles nous allons donner quelques explications, en même temps que nous passerons en revue les principaux points sur lesquels doit se porter l'attention de l'ingénieur chargé de l'entretien du matériel roulant.

Enveloppe. — On sait que, sauf sur les chemins de fer non exposés à des inondations, l'enveloppe ou cuirasse doit être aussi étanche que possible. Dans les moteurs d'ancien modèle où il existe des ouvertures importantes, on peut obtenir une étanchéité suffisante en rapportant sur ces orifices des tôles convenablement découpées et embouties, qu'on fixe à l'aide de quelques vis. Dans les moteurs complètement cuirassés, il n'existe qu'un petit nombre de points par où l'humidité puisse pénétrer. Il est bon de recouvrir les lèvres du joint suivant lequel se fait l'ouverture de l'enveloppe d'une couche de peinture grasse, composée, par exemple, d'un mélange de paraffine, de vaseline et de résine, qu'on étend avant de fermer le moteur. Mais il existe dans beaucoup de types un autre joint, entre le couvercle et la partie supérieure des paliers

qu'il est beaucoup plus difficile de rendre étanche, parce qu'il est plus étroit et moins bien ajusté; il est utile, lorsque la voiture doit circuler sur des voies mal nettoyées, de protéger cette partie du moteur contre l'eau ou la boue projetée par les roues, en suspendant au truck à l'endroit convenable une feuille de tôle servant de garde-crotte.

Quoi qu'on fasse, on doit prévoir qu'un peu d'eau pénétrera dans le moteur et l'on peut en assurer l'écoulement en réservant au fond de l'enveloppe un trou de vidange fermé par un bouchon taraudé, muni d'une fente ou d'un orifice convenable ; les ingénieurs américains conseillent de ne pas donner à cet orifice moins de 10 à 15 mm. de diamètre.

Les boulons servant à réunir entre elles les différentes parties de l'enveloppe ou à fixer à celle-ci les diverses pièces du moteur doivent avoir leurs écrous serrés à bloc; il faut éviter néanmoins de les soumettre à un effort excessif par l'action d'une clef trop puissante, car leur résistance aux chocs et autres efforts qu'ils ont à subir pendant la marche se trouverait réduite d'autant et il pourrait se produire des ruptures souvent fort gênantes. Tous les écrous dont le desserrage sous l'influence des vibrations est à craindre doivent être retenus par une goupille ou un contre-écrou.

Il faut éviter de laisser des têtes de boulon ou des écrous dépasser à la partie inférieure du moteur, car une pierre ou un obstacle placé sur la voie pourrait les faire sauter, et le boulon, devenu libre à l'intérieur de l'enveloppe, risquerait d'endommager fortement l'armature en s'engageant entre elle et les pièces polaires.

Coussinets. — Les coussinets sont généralement, comme nous l'avons dit, en métal blanc; mais l'expérience a démontré que, dans bien des cas, il valait mieux avoir recours à des garnitures plus résistantes[1]. En Amérique, après avoir renforcé la coquille en fonte servant de support à la garniture mince en métal blanc, on a remplacé, sur certaines lignes, ce métal par du bronze ; sur d'autres, on en est même venu à employer des coussinets pleins entièrement en bronze ; l'entretien semble ainsi plus dispendieux, puisque, dès que l'usure atteint la valeur fixée, il faut renouveler non seulement une petite épaisseur de métal, mais le coussinet tout entier ; néanmoins, bien des ingénieurs préconisent ce système comme plus économique en fin de compte, par suite de la plus grande durée des coussinets et de la diminution des chances d'avarie à l'armature.

Il est toujours à craindre, en effet, que, par suite d'une trop grande usure des coussinets, l'armature ne vienne frotter contre les pièces polaires. L'entrefer étant d'environ 3 à 3,5 mm. dans la majorité des moteurs de tramways, lorsque l'arbre est bien centré, on conçoit qu'une usure de 2 à 2,5 mm. soit un maximum[2]. Par exemple, pour le moteur G. E. 800, qui a un entrefer de

[1] A condition, bien entendu, que le graissage soit toujours parfaitement assuré, car si le lubrifiant vient à manquer, le métal blanc n'est exposé qu'à fondre, tandis qu'un métal plus dur, tel que le bronze, grippera et coupera l'arbre infailliblement.

[2] Nous ne parlons pas des moteurs polyphasés, pour lesquels le jeu permis est encore bien plus faible.

1/8 de pouce (3,17 mm.), on n'admet pas un jeu de plus de 1,6 mm. du côté du collecteur. Il faut donc surveiller de très près cette usure[1].

Dans les types où les coussinets sont visibles, le jeu se mesure facilement en introduisant entre l'arbre et le coussinet supérieur une petite réglette taillée en biseau et dont les épaisseurs sont indiquées par une graduation, comme le montre la figure 723.

La difficulté est de mesurer ce jeu lorsque la construction du moteur ne permet pas d'accéder aux coussinets par le dehors. On peut alors recourir à l'un des artifices suivants : pour les paliers où l'usure se fait sur le coussinet supérieur, on enlève, par exemple, le chapeau du palier et le coussinet supérieur qu'on remplace par une boule de mastic dur sur laquelle on resserre le chapeau ; en retirant ensuite le mastic, il suffit de comparer son épaisseur à celle du coussinet pour connaître l'usure de celui-ci. Pour les paliers où l'usure se fait sur le coussinet inférieur, ce procédé ne s'applique pas ; on peut opérer, dans ce cas, en soulevant l'armature à l'aide d'un crochet qu'on passe sous l'arbre, et mesurant à l'aide d'une réglette verticale munie d'un curseur le déplacement que subit le bout d'arbre sortant du moteur ; le crochet destiné à cet usage peut se faire en tôle d'acier de 3 à 4 mm. ; on le perce d'un œil dans lequel on engage une chaîne de 1 m. de longueur environ formant boucle, et l'on passe dans celle-ci un levier qu'on appuie sur le plancher de la voiture ; pendant qu'un homme soulève ainsi l'armature de l'intérieur, un autre fait la mesure sous le truck.



Fig. 723. — Réglette graduée pour la mesure du jeu de l'armature.

Quand on emploie toujours la même graisse et des coussinets toujours semblables, on peut se dispenser de ces vérifications, à la condition de tenir une comptabilité exacte des parcours effectués par chaque voiture : l'usure est en effet proportionnelle à ce parcours et il suffit de l'avoir déterminée par expérience sur quelques moteurs pour connaître le nombre moyen de kilomètres que peut effectuer un coussinet ; dès que ce parcours est atteint par un coussinet, on le remplace sans se préoccuper de le vérifier individuellement.

Graissage. — Le graissage des dynamos se fait aujourd'hui généralement par bagues et à l'huile minérale dans toutes les installations fixes. Quelques constructeurs ont conservé ce procédé pour les moteurs de traction ; mais on est ainsi exposé à avoir des projections d'huile trop abondantes sous l'influence des chocs produits par la voie. Aussi préfère-t-on ordinairement employer des graisses minérales consistantes. Celles-ci présentent, par contre, un autre inconvénient, celui de ne devenir fluides que par l'effet de l'échauffement ; leur écoulement peut donc être trop tardif et plus ou moins intermittent. Pour le régulariser, on dispose souvent dans

[1] Pour empêcher l'armature de venir au contact des pièces polaires, certaines des compagnies qui ont conservé l'emploi des coussinets en métal blanc les munissent de chaque côté de bagues en acier limitant le jeu de l'arbre.

la boîte à graisse une broche en cuivre dont la pointe pénètre dans l'orifice d'écoulement jusqu'à l'arbre et dont l'autre extrémité peut être munie de petites ailettes; cette broche, en métal plus conducteur que le fer, répartit l'échauffement d'une manière plus uniforme et détermine un écoulement continu et régulier du lubrifiant. Certaines compagnies se trouvent bien du graissage à l'huile effectué au moyen d'un tampon amenant le liquide au contact de l'arbre par capillarité; on n'a pas ainsi à craindre, comme avec la graisse, l'introduction de matières étrangères entre l'arbre et le coussinet. D'autres emploient à la fois les deux procédés.

En tout cas, il faut surveiller avec soin les quatre boîtes à graisse de chaque moteur et les garnir abondamment; tous les soirs, on remuera la graisse et l'on y ajoutera au besoin un peu d'huile si elle est devenue trop épaisse; on enfoncera de la graisse autour de la broche et on s'assurera que celle-ci repose bien sur l'arbre. De temps en temps, on videra complètement les boîtes et on les lavera, ainsi que les coussinets, en introduisant de l'essence de pétrole qui dissoudra le cambouis. Quand on ouvrira les boîtes, on aura soin de ne pas y laisser entrer de sable ni de poussière.

Il est particulièrement important d'empêcher que la graisse ou l'huile ne pénètre à l'intérieur du moteur, car elle y causerait des dommages tout aussi importants que l'humidité; elle forme en effet, en se mélangeant à la poussière de charbon et à la limaille du collecteur, des enduits conducteurs qui peuvent établir des courts-circuits, soit entre les barres du collecteur, soit entre les connexions de l'armature. Il est donc nécessaire que le graissage ne soit pas trop abondant et que la matière lubrifiante qui s'écoule le long de l'arbre soit arrêtée à sa sortie du coussinet du côté du collecteur. Si le palier ne comporte pas un bon évent comme celui de la figure 123 (p. 154), par où l'huile se trouve rejetée au dehors, on peut creuser à sa partie inférieure un petit canal d'évacuation de 15 à 20 mm. de diamètre ou protéger l'arbre par un collet ou une bague rapportée présentant une saillie totale de 4 à 5 cm. à partir de l'arbre et une largeur de 15 mm. à la base et de 2 à 3 mm. seulement à l'extrémité.

Bobines d'inducteurs. — Les bobines d'inducteurs ont deux accidents à redouter : la mise à la masse par rupture d'isolant et l'établissement d'une dérivation entre les spires par imbibition d'humidité ou de graisse. Dans les deux cas, il se produit peu à peu une carbonisation de l'isolant qui amène une mise en court-circuit de tout ou partie de la bobine; cette carbonisation peut d'ailleurs n'être pas apparente à l'extérieur, si elle a lieu au voisinage du noyau. Pour éviter pareil accident, nous venons d'indiquer les précautions à prendre en ce qui concerne la pénétration de l'humidité et de la graisse. Dans certains moteurs, où l'une des bobines se trouve placée juste à la partie inférieure de l'enveloppe, on a cru bien faire en l'entourant d'une gaine étanche en tôle galvanisée; mais, dans certains cas, le remède peut être pire que le mal, car si l'humidité arrive dans la bobine par le haut ou s'y accumule par distillation, elle ne trouve plus d'écoulement; il peut donc être préférable de supprimer la tôle galvanisée et de se contenter de relever un peu la bobine en intercalant à sa base une ou plusieurs rondelles munies de fibre ou de micanite pour la séparer de l'enveloppe. Cette précaution est même bonne à prendre pour toutes les bobines. Il peut être prudent aussi de préserver les parties voisines du collecteur contre

les projections de limaille ou de poussière, ainsi que contre les étincelles et les arcs qui se produisent aux balais lorsque le champ est trop faible, à l'aide d'un écran en mica ou en un autre isolant réfractaire, convenablement disposé (fig. 735, p. 352).

Quand on croit qu'une bobine a été mise en court-circuit, ce dont on s'aperçoit soit par son échauffement anormal, soit par des étincelles aux balais, il est bon de s'en assurer par une mesure d'isolement. On remplace alors, s'il y a lieu, la bobine avariée par une autre fournie par le fabricant, ou mieux construite dans les ateliers de réparation de la Compagnie, car toutes les compagnies d'exploitation importantes construisent elles-mêmes leurs bobines à la machine, de même qu'elles réparent leurs armatures : le fil, de grosseur convenable, est bobiné sur une forme appropriée, dont les figures 140 (t. I, p. 172) et 724 donnent des exemples, en imbibant bien chaque couche d'un bon isolant, tel qu'une dissolution de gomme-laque dans l'alcool; la forme est animée d'un mouvement lent de rotation donné par une petite machine spéciale; les encoches dont la forme de la figure 724 est munie permettent d'interposer un ruban entre deux couches; une fois la bobine terminée, on la retire en dévissant les deux parties de la forme, puis, avant de la mettre en service, on la dessèche parfaitement à l'étuve.

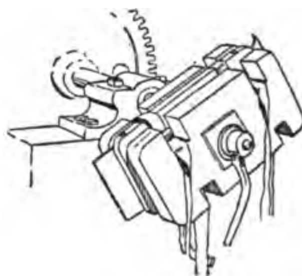


Fig. 724. — Exécution à la machine du bobinage d'un inducteur de rechange.

Armature. — Les deux principaux ennemis de l'armature sont encore la graisse et l'humidité, aidées par la limaille et la poussière de charbon qui se logent en particulier sur les fils de connexion entre le collecteur et l'armature et dans les fourches des induits qui en comportent, et y établissent des dérivations susceptibles d'amener par échauffement la destruction de l'isolant. Pour réduire les inconvénients de cette nature, il est bon de proscrire toute disposition du genre de celle de la figure 725, qui présente une sorte de gorge et de nid à poussière *a* entre les deux organes.

Les fils de l'armature peuvent également être endommagés par des frottements mécaniques; c'est un des motifs pour lesquels il est bon de loger les bobines dans des encoches. Le meilleur moyen de préserver les induits consiste à recouvrir soigneusement les fils de base par des enveloppes en forte toile imbibée de matière isolante, dont on sature du reste aussi les paquets de fils; mais on réduit ainsi le refroidissement et cet inconvénient fait que beaucoup de constructeurs renoncent actuellement à ce procédé.

Lorsque, malgré tout, un court-circuit s'est produit dans une ou plusieurs sections d'induit, ce qui peut arriver en particulier si le moteur a été surchargé d'une manière excessive, il faut rechercher les sections endommagées et les remplacer. Dans ce but, on retire l'armature du moteur comme nous l'expliquerons tout à l'heure, on sépare le collecteur et l'on recherche par l'une des méthodes ordinaires les sections où l'isolement fait défaut. Leur remplacement est très facile lorsqu'on emploie des enroulements du genre Eickemeyer, car il suffit d'enlever le quart des bobines. On peut avoir des sections de

rechange achetées toutes faites, ou mieux les bobiner soi-même sur une forme analogue à celle de la figure 145 (t. I, p. 175). On vérifie ensuite l'isolement à l'ohmmètre, par exemple, et l'on porte l'armature à l'étuve jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement sèche ; après quoi l'on vérifie l'isolement à haute tension (voir p. 373) et l'on refait les connexions avec le collecteur. La température de l'étuve ne doit pas être inférieure à 100° ; un des procédés les plus simples pour la chauffer est d'y mettre des radiateurs électriques dans lesquels on envoie le courant de la ligne ou celui des moteurs en expérience.

Les vieilles armatures dont l'isolant a été peu à peu affaibli courent surtout des risques en temps d'orage ; une décharge de foudre peut en mettre en une seule fois plusieurs prématurément hors de service.

Il est d'une bonne économie d'envoyer régulièrement, toutes les six semaines par exemple, les armatures à l'atelier pour les faire essayer, même quand elles paraissent en bon état. Si l'essai montre une résistance d'isolement suffisante, on se contentera de mettre l'armature sur le tour, de rectifier le collecteur et de noter les diamètres de l'arbre et du collecteur et la condition du pignon ; sinon, on séchera l'armature et on l'essaiera à nouveau ; en dernier recours, on la démontera pour rechercher les bobines défectueuses.

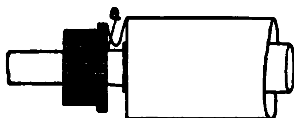


Fig. 725. — Mauvaise disposition des fils entre l'armature et le collecteur.

Quoi qu'on fasse pour entretenir le bon isolement des armatures, leur durée est souvent limitée à un petit nombre d'années [1] par une cause étrangère à l'isolant, la cristallisation du métal des conducteurs ; le seul moyen de prévenir ce changement moléculaire, c'est d'empêcher tout mouvement des fils, particulièrement sur les bases du tambour, et de munir le moteur d'une suspension parfaitement élastique.

En tout cas, quand un induit est déjà vieux, il vaut souvent mieux le rebobiner entièrement à neuf que de remplacer des sections isolées.

Si, après une ou plusieurs réparations, une armature continue à brûler, cela indique en général qu'une des bobines d'inducteurs est en court-circuit, et l'on devra vérifier le moteur à ce point de vue.

Parmi les autres accidents qui peuvent arriver aux induits il faut signaler l'introduction d'un corps étranger entre l'armature et les inducteurs, un trop fort jeu longitudinal de l'arbre et enfin un déplacement de l'armature le long de ce dernier. Le jeu de l'arbre doit toujours être limité à une très faible valeur et l'on doit le vérifier de temps à autre. Quant au glissement de l'armature, il ne peut provenir que d'un desserrage de l'écrou qui la retient ; il faut la remettre en place en exerçant une forte pression à l'aide d'un vérin ou d'une presse hydraulique, puis revisser l'écrou et fixer solidement la goupille destinée à le maintenir.

Inégalité des champs des moteurs d'un équipement double ou multiple. — Lorsqu'un moteur chauffe plus que les autres et qu'on n'y trouve aucun défaut,

[1] Sur beaucoup de tramways américains la durée des armatures n'est guère supérieure à deux ans ; souvent même leurs fils commencent à se briser dès la première année.

cet échauffement est dû à une inégalité des champs magnétiques, qui entraine une inégalité des courants consommés. Après avoir constaté cette différence avec deux ampèremètres, on doit la corriger, soit en changeant les moteurs pour les mieux appareiller, soit en affaiblissant légèrement le champ de ceux qui ne prennent pas une part suffisante du courant total. Ce dernier résultat s'obtient en intercalant une résistance additionnelle dans le circuit inducteur du moteur qui s'échauffe le moins ou en séparant légèrement les deux parties de son enveloppe par l'insertion de cales minces en tôle de 0,5 à 1 mm. d'épaisseur; ces cales doivent avoir la même section que les lèvres entre lesquelles elles sont insérées et être percées de trous à travers lesquels on fait passer les boulons réunissant les deux parties de l'enveloppe pour les maintenir solidement en place; elles ne doivent pas être trop épaisses, afin de ne pas rompre l'équilibre des moteurs en sens inverse.

Démontage des armatures. — Les armatures peuvent être retirées des moteurs, sans enlever la caisse du truck, soit par les trappes aménagées à l'intérieur de la voiture, soit par dessous, en amenant la voiture sur une fosse. Dans le premier cas, on accroche les deux extrémités de l'arbre à une chaîne mouflée prenant appui sur une chèvre (fig. 726), ou bien sur un chevalet formé d'une forte pièce de bois reposant sur deux cadres dressés contre les portes (fig. 727) ou passée à travers les fenêtres et supportée du dehors; on peut aussi installer une grue à volée assez longue pour pénétrer dans l'intérieur de la voiture jusqu'au-dessus de la trappe (fig. 728) : l'armature est suspendue à cette volée, après quoi l'on retire la voiture, et l'armature peut être transportée à l'atelier. Dans le second cas, on peut encore descendre l'armature à l'aide d'une chèvre, ou bien on place dans la fosse un petit truck portant un vérin (fig. 729) qui sert d'abord à soulever la carcasse du moteur pour dévisser les boulons et reçoit ensuite l'armature lorsque le moteur est ouvert.

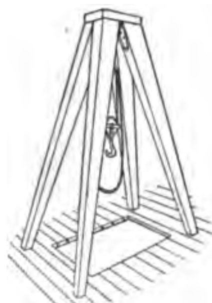


Fig. 726. — Chèvre pour l'enlèvement des armatures par les trappes.

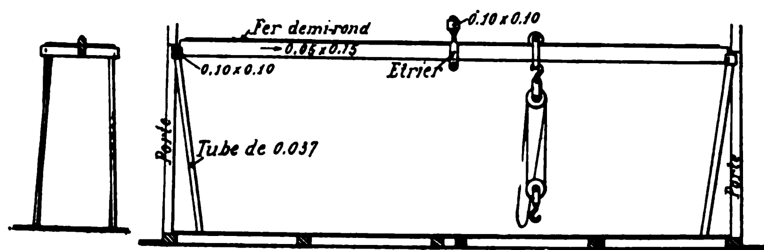


Fig. 727. — Chevalet établi dans une voiture pour le démontage des moteurs.

Le transport des armatures doit se faire avec grand soin; on emploie à cet effet soit ce même truck à vérin, soit de petits transbordeurs, qui peuvent s'établir à peu de frais avec des fers en I ou des madriers servant de chemin de roulement à un chariot (fig. 730), soit des véhicules spéciaux tels que celui de

la figure 731, soit encore de simples brancards garnis d'un matelas (fig. 732). Certaines compagnies ont disposé dans leurs ateliers des voies sur lesquelles

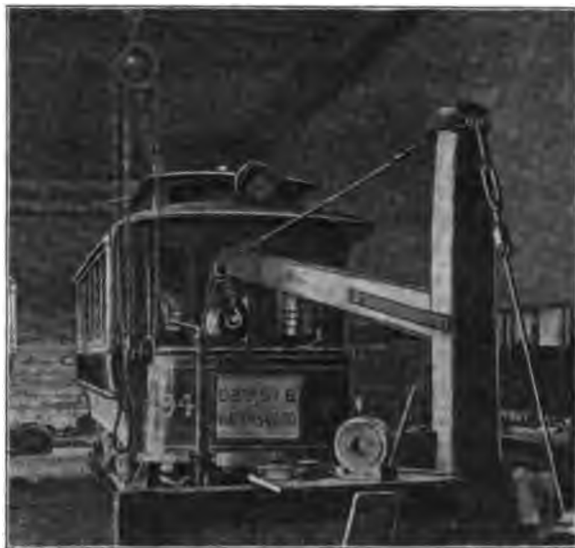


Fig. 728. — Grue pour le démontage des armatures.

circulent des fourgons munis de petites grues qui servent au même usage. Il faut avant tout éviter de déposer les armatures sur des corps durs, et à plus

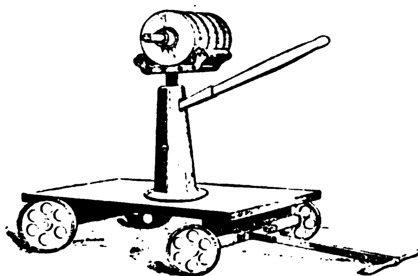


Fig. 729. — Chariot à vérin servant au démontage et au transport des armatures.

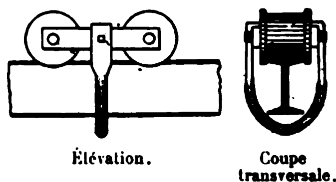


Fig. 730. — Disposition d'un petit transbordeur pour ateliers de réparations.

forte raison de les rouler sur le sol, car les chocs endommagent rapidement les isolants et les fils.

Arbre. — Les arbres doivent être très robustes pour résister aux efforts de flexion qu'ils sont exposés à subir par suite d'une dissymétrie des champs magnétiques et des efforts de torsion engendrés lors des freinages rapides, ou lorsqu'une dent d'engrenage rompue vient s'engager entre les roues dentées et

en détermine l'arrêt brusque. Quand un arbre est faussé ou détérioré, il faudrait pouvoir le retirer et le remplacer par un autre; mais c'est en général une opération assez compliquée[1] dont on désire autant que possible s'affranchir. On réussit souvent à redresser un arbre faussé de la manière suivante : on couvre d'une épaisse couche de vernis isolant toute la base du bobinage tournée du côté où l'arbre est faussé; puis, après séchage, on place sur cette base un matelas isolant de coton mouillé protégé par une feuille épaisse d'amiante



Fig. 731. — Chariot à armature.

également mouillée, enfilée sur l'arbre et solidement ficelée autour de l'armature; celle-ci étant ainsi protégée, on met au feu la portion d'arbre à redresser et on la porte le plus rapidement possible au rouge sombre ; aussitôt fait, on retire l'arbre et on le redresse au marteau. Quand l'arbre n'est que très légèrement faussé, le redressement peut même se faire plus simplement à froid : la figure 733 montre un appareil très rustique combiné dans ce but et qui

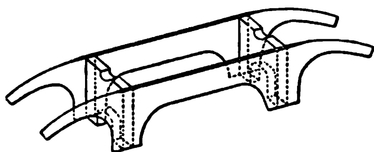


Fig. 732. — Brancard pour le transport des armatures.

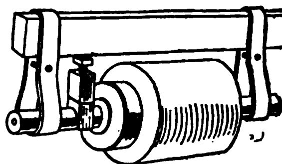


Fig. 733. — Appareil à redresser les arbres faussés.

comporte un vérin à vis prenant appui sur une forte poutre à laquelle l'arbre est suspendu par deux étriers.

On a vu plus haut comment on pouvait retirer l'armature de l'arbre en dévissant la bague qui la retient et appliquant une forte pression de l'autre côté à l'aide d'un vérin ou d'une presse hydraulique; les portées de l'arbre sont généralement coniques dans le but de faciliter cette manœuvre.

Quand on a remis l'armature en place, également à l'aide d'une forte pression, on revisse l'écrou à fond et on le goupille.

[1] Certains moteurs récents ont leur arbre amovible et interchangeable (voir t. I, p. 156).

Collecteur et balais. — Le collecteur doit être tenu très propre et bien rond. Malheureusement, il est soumis à deux causes de destruction principales, les étincelles, qui en usent et en détériorent la surface, et les courts-circuits entre lames, qui en détruisent l'isolant, en même temps qu'ils endommagent l'armature.

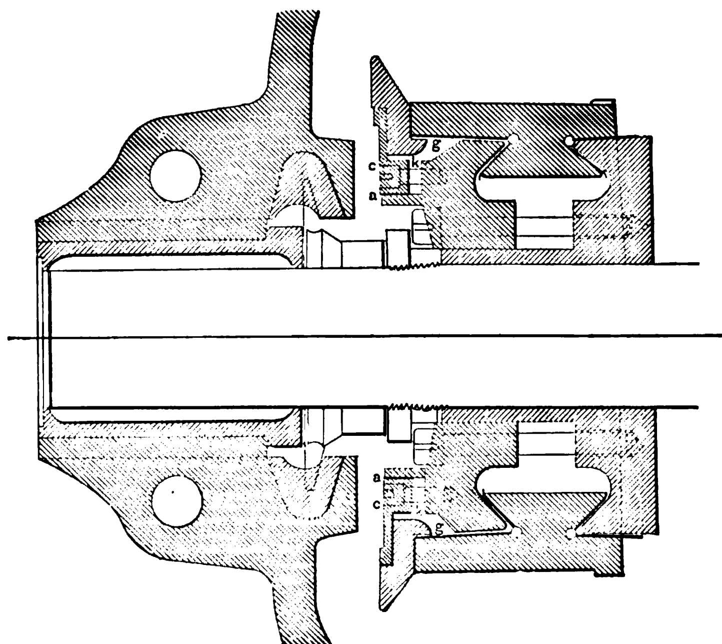


Fig. 734. — Mauvaise disposition de collecteur.

Les courts-circuits ont généralement pour origine soit la formation d'un enduit conducteur entre les lames voisines par de la limaille de cuivre ou des poussières de charbon agglutinées par l'humidité ou la graisse, comme nous l'avons dit plus haut, soit une pénétration de graisse le long de l'arbre sous le collecteur; par exemple, dans le collecteur représenté par la figure 734, la graisse peut arriver par le joint *a* et les trous de vis *c* jusqu'au contact de l'isolant en mica *g* et déterminer ainsi un court-circuit intérieur. Pour prévenir ce dernier accident, il est bon de remplir tous les vides par où la pénétration pourrait se produire d'un mélange isolant de plâtre de Paris et de gomme-laque.

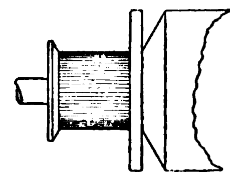


Fig. 735. — Protection de l'armature contre les étincelles par un disque en stabilite.

Il est souvent à craindre que les étincelles ne jaillissent du collecteur aux surfaces métalliques voisines, ce qui cause de graves courts-circuits ; lorsque cet accident se produit par suite d'un défaut de construction du moteur, on peut en prévenir le retour en garantissant les extrémités du collecteur soit par un disque isolant comme celui de la figure 735, soit simplement par un manchon en carton d'amiante

retenu par un frettage en fils d'acier et protégé lui-même par de l'amiante, comme le montre la figure 736. Le mieux, pour éviter tout danger de brûler l'armature, est d'employer des barres de collecteur avec retour d'équerre très allongé, comme celle de la figure 156 (t. I, p. 184).

Les balais doivent toujours présenter une bonne surface de contact sur le collecteur ; ils doivent avoir la largeur d'une touche environ. Il ne faut pas les laisser s'user jusqu'au point où les ressorts ne les presseraient plus suffisamment. On doit s'assurer qu'ils sont bien libres dans leur porte-balais et avoir soin, lorqu'on les retire, de toujours les remettre dans la même position et dans le même sens.

Il est utile de resserrer de temps en temps les ressorts des porte-balais, à mesure que le collecteur et les balais s'usent, de façon à maintenir la pression de ces derniers constante. La figure 737 montre deux types de porte-balais où cet ajustement s'opère facilement à l'aide d'un écrou à ailettes.

Il arrive quelquefois qu'un arc saute du collecteur ou d'un porte-balais à la carcasse inductrice, produisant une mise à la terre du moteur, qui s'arrête alors brusquement : c'est ce qu'on appelle en Amérique le « bucking ». Cet accident est presque toujours dû à une pression insuffisante des balais.

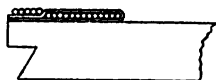


Fig. 736. — Garniture d'amiante à l'extrémité du collecteur.

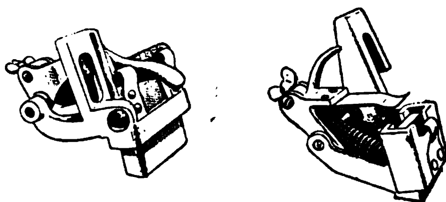


Fig. 737. — Porte-balais ajustables.

Tant qu'une armature, son collecteur, ses balais et porte-balais sont en bon état, il ne doit pas se produire d'étincelles aux balais en régime normal. La surface du collecteur reste brillante avec une teinte brun chocolat foncé ; les balais produisent un simple bruissement caractéristique d'une bonne marche. Il faut alors se borner à nettoyer de temps en temps le collecteur avec soin, en y passant un morceau de toile huilée ou des chiffons de laine de façon à n'y laisser ni saleté ni cambouis.

Lorsqu'on constate des étincelles, elles peuvent provenir de plusieurs causes différentes, notamment les suivantes :

1° *Le mauvais état des porte-balais ou des balais*, qui a pour conséquence un mauvais contact entre le collecteur et les balais ; on s'en aperçoit aisément à l'échauffement exagéré du porte-balais défectueux. La cause connue, il est facile d'y remédier : si les balais sont collés au porte-balais, on les décolle et les rend libres ; s'ils sont brisés ou brûlés, on les remplace ou on les lime au papier de verre jusqu'à ce que le contact soit redevenu bon ; cette dernière opération se fait en plaçant une feuille de papier de verre sur le collecteur, la face rugueuse tournée vers le balai, et imprimant à l'arbre un mouvement de va-et-vient. Il faut veiller en outre à ce que les balais soient bien à l'alignement et ne couvrent pas plus de deux sections. Il faut enfin éviter les

ressorts trop serrés, qui amènent de l'échauffement et une usure excessive des balais et des lames.

2° *Le mauvais état du collecteur ;* celui-ci devient noir et a besoin d'être remis à vif par un nettoyage au papier de verre ou même par un passage au tour s'il ne tourne plus bien rond ou s'il présente trop de rugosités résultant de l'usure. Ce noircissement du collecteur se produit rapidement si l'une des lames est trop enfoncée ou fait au contraire saillie ; dans ce cas, la remise sur le tour est indispensable. Les inégalités de hauteur des lames ou des isolants donnent lieu, d'autre part, à un grincement qui doit appeler l'attention du mécanicien.

3° *Une interruption dans le circuit de l'armature* produit à chaque demi-révolution, même à faible vitesse et à faible régime, de violentes étincelles donnant lieu à une flamme verdâtre continue autour du collecteur, ce qui permet de reconnaître facilement ce cas ; on détermine aisément la section coupée en déplaçant deux prises de courant autour du collecteur avec un ampèremètre ou une sonnerie et une pile en circuit ; elle est du reste indiquée par les piqûres du collecteur. Il faut refaire les connexions et la bobine ; provisoirement, on peut réunir les deux lames correspondantes par une soudure.

4° *Un court-circuit dans le collecteur ou l'induit* produit aussi une flamme ; on constate alors que le courant est exagéré, ce qui peut amener la fusion du coupe-circuit, et l'effort moteur réduit ; l'armature tourne d'une manière saccadée ou s'arrête. On trouve le court-circuit par la méthode potentiométrique de la figure 765 (p. 379). Si le court-circuit est dû à des enduits graisseux et des poussières à la surface du collecteur, il peut se produire une mise à la terre complète du moteur, qui s'arrête brusquement au delà d'une certaine vitesse. On doit alors nettoyer la surface du collecteur avec soin ; si c'est insuffisant, on le démonte ; enfin, si le court-circuit a lieu dans une section d'armature, il faut la rebobiner.

5° *Un affaiblissement des champs inducteurs ;* ce fait, qui est une des causes les plus fréquentes de flamme continue au collecteur par exagération de courant dans l'induit, peut avoir plusieurs causes : court-circuit dans une bobine inductrice ou communication de celle-ci à la masse, erreur de montage qui intervertit les signes de certains pôles et réduit ainsi la force électromotrice ; interposition de cales dans le joint de fermeture de la cuirasse, etc. Les courts-circuits se découvrent aisément par la mesure de l'isolement et de la résistance de chaque bobine ; on peut du reste, en approchant un morceau de fer des pôles, apprécier leur affaiblissement ; une aiguille aimantée permet de découvrir les inversions de polarité ; quant aux cales dans les joints, il suffit de chercher pour les trouver ; il est bon de rappeler que les mécaniciens peuvent être tentés d'en mettre pour rattraper le jeu entre l'armature et les pièces polaires après usure des coussinets. Quand on voit une armature brûler plusieurs fois de suite, cela indique en général une insuffisance de champ magnétique.

Les réparations des collecteurs peuvent consister en un tournage de la surface, dans le remplacement d'un certain nombre de lames ou d'isolants ou même dans celui de l'organe entier.

Pour tourner les collecteurs formés de lames en cuivre rouge, on ne peut

employer le même genre d'outil *a* (fig. 738) que pour travailler le laiton ; il faut des outils spéciaux qui puissent tailler franchement le métal sans le mater dans les joints entre les lames ; on peut employer en particulier des outils des formes *b* et *c*, le premier pour dégrossir, le second pour finir. On fera bien de ne pas entailler toute la longueur et de laisser des bourrelets sur les bords. Après avoir été retiré du tour, le collecteur doit être nettoyé avec soin ; on doit visiter les joints et retirer tous les fragments de métal qui auraient

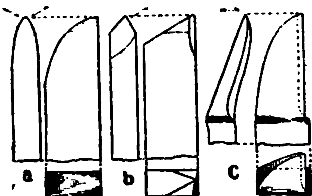


Fig. 738. — Outils à tourner les collecteurs.

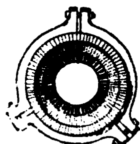


Fig. 739. — Anneau d'assemblage pour le montage du collecteur.

pu y pénétrer ; on vérifie ensuite l'isolement entre barres avec une pile et une sonnerie ou mieux avec un ohmmètre.

Pour le remplacement des lames, on doit être approvisionné de segments tout faits, généralement moulés sous forte pression ou étirés, et de feuilles de mica découpées à la dimension correspondante.

Une des causes qui peuvent contribuer à dégrader un collecteur et à user les balais est l'emploi d'un isolant trop dur entre les lames, car, si cet isolant s'use moins vite que le cuivre, il forme au bout de quelque temps des arête- en saillie. Certaines compagnies américaines ont été ainsi conduites à abans

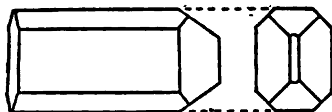


Fig. 740. — Fer à souder les jonctions du collecteur.

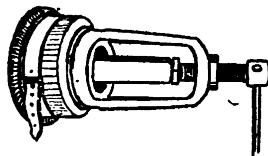


Fig. 741. — Appareil à démonter les collecteurs.

donner pour cet usage le mica blanc dur de l'Inde au profit du mica ambre plus tendre du Canada, et elles s'en déclarent très satisfaites ; on divise ce mica en feuilles aussi minces que possible et on en superpose un certain nombre pour réaliser une épaisseur de 0,8 à 1 mm., puis on serre entre les lames, sans emploi de gomme-laque ; les collecteurs ainsi constitués s'usent très également.

Pendant le montage, on se sert utilement, pour retenir les segments, d'un anneau de serrage en trois parties assemblées par des boulons (fig. 739) ; on l'enlève après tournage et fixation des bagues.

Pour détacher le collecteur de l'armature, il faut démonter tous les fils ; il est bon d'employer dans ce but un fer à souder très petit (fig. 740) ayant la section voulue (2×15 mm., par exemple) pour pénétrer dans l'encoche étroite où sont logées les extrémités des fils.

Le collecteur est généralement ajusté sur une portée conique, avec une clavette qui l'empêche de tomber, et maintenu par un écrou très mince vissé sur l'arbre. Pour le retirer, on emploie avantageusement une sorte de vérin tel que celui de la figure 741, dont le cercle de base est taraudé intérieurement au même diamètre que la bague qui serre le collecteur sur sa portée ; on dévisse celle-ci et on visse le cercle de base à sa place ; il suffit alors de tourner la vis de droite, qui vient s'appuyer contre l'extrémité de l'arbre, pour attirer le collecteur au dehors. Avant d'enlever la bague, on retient ensemble les segments du collecteur à l'aide d'une courroie, comme le montre la figure.

Engrenages. — Les engrenages doivent rester bien polis; sinon le métal est mauvais. Ils doivent aussi s'user également sur toute la largeur de la dent; s'il en est autrement, c'est que l'arbre moteur n'est pas bien parallèle à l'essieu, ce qui donne lieu à une augmentation des frottements. Le jeu dans les coussinets ne doit pas non plus être exagéré, sous peine d'accroître ces frottements.

On doit vérifier de temps en temps le degré d'usure des pignons et voir si les écrous sont bien serrés. On peut s'assurer rapidement du bon état des engrenages en lançant la voiture à grande vitesse sur une partie de voie bien unie et écoutant par les trappes le bruit que fait la transmission, après avoir supprimé le courant ; un excès de jeu ou la présence d'un corps étranger entre les dents produit un son de ferraillement; un défaut de jeu, au contraire, produit un grincement, et, s'il s'agit de pignons en cuir durci, un véritable criaillement comme celui d'un balai en charbon trop dur sur un collecteur. S'il y a un excès de jeu, il provient en général d'une usure de la clavette correspondante et l'on doit la remplacer aussitôt. Si l'une des roues d'engrenages ne tourne pas rond, le grincement sera périodique. La durée du parcours et le ralentissement plus ou moins rapide de la voiture ainsi lancée peuvent aussi donner à un agent exercé d'utiles indications sur l'état des engrenages.

Les paliers à excentrement, tels que ceux de la Société Alsacienne (t. I, p. 218), qui permettent de rattraper le jeu des engrenages au fur et à mesure de l'usure, sont très recommandables au point de vue de la diminution du ferraillement.

Le jeu des pignons peut en général, grâce à leur portée conique, être rattrapé à l'aide d'un écrou placé à l'extrémité de l'arbre, après avoir forcé le pignon sur l'arbre à l'aide d'un marteau.

Lorsque, par suite de l'usure ou du bris d'une dent, les engrenages doivent être changés, on démonte la roue ; quant au pignon, on peut le retirer en frappant avec un ciseau dans le fond d'une denture.

Dans certains moteurs, le pignon est entré de force sur l'arbre; il faut alors, pour l'enlever, démonter l'induit et attirer le pignon au dehors à l'aide d'un étrier en fer muni d'une vis centrale s'appuyant contre l'extrémité de l'arbre.

On évitera le desserrage des paliers d'essieu, qui peut causer la rupture des engrenages par suite du mauvais alignement du pignon et de la roue.

Les boîtes d'engrenages doivent être maintenues bien propres et leurs boulons bien serrés de façon à supprimer tout jeu ; on doit vérifier fréquemment, en regardant par la petite trappe supérieure, qu'il reste suffisamment de

graisse et remplir la boîte aussi souvent que c'est nécessaire, tout en évitant avec soin l'introduction de matières étrangères, sable, boue, et surtout objets solides tels que clous, boulons, etc., qui amèneraient infailliblement des ruptures de dents.

Régulateurs et accessoires. — Il faut maintenir un bon isolement entre les bagues de contact, qui se mettent facilement en court-circuit par des enduits de graisse mélangée de poussières ou de limailles métalliques. Il est bon également de conserver les bagues et frotteurs en état de propreté et d'enlever au besoin les rugosités qui empêcheraient un bon contact des balais; il faut, en conséquence, ouvrir fréquemment la boîte, examiner les contacts, les brosser avec soin, ainsi que tous les organes et l'intérieur de la boîte, de manière à enlever toute la poussière, et les polir au papier de verre lorsqu'ils deviennent rugueux ; il est bon de graisser très légèrement les frotteurs avec de la vaseline pour éviter qu'ils ne deviennent secs et coupants ; on devra bien serrer les vis qui les maintiennent, ainsi que les parties amovibles des bagues et les bornes de connexion, vérifier la bonne pression des ressorts et lubrifier les roues d'enclenchement et d'encliquetage, sans laisser couler d'huile sur les bagues qu'on risquerait ainsi de court-circuiter.

Les rhéostats demandent peu d'entretien, s'ils ont été bien proportionnés de façon à pouvoir supporter l'échauffement auquel ils sont soumis; il est seulement essentiel de les maintenir à l'abri de l'humidité lorqu'ils sont en tôle de fer, car la rouille en se dilatant se créerait un passage à travers l'isolant et produirait des courts-circuits.

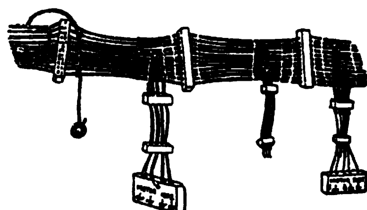


Fig. 742. — Modèle pour la confection des câbles.

Il est bon de munir les extrémités des divers câbles aboutissant au régulateur de manchons protecteurs portant des numéros de correspondance et de remplacer ces manchons lorsqu'ils sont abîmés ou perdus. On évite ainsi des recherches pénibles à faire avec une pile et une sonnerie, en même temps qu'on protège les câbles.

Pour faciliter aux ouvriers l'exécution ou la réfection des câbles à plusieurs conducteurs dont nous avons donné plus haut des exemples (t. I, p. 397) et qui servent aux connexions entre les régulateurs et les moteurs, certaines compagnies américaines, par exemple la Chicago City Railway Co., emploient avec avantage des modèles en corde (fig. 742) qui représentent tous les câbles et indiquent les épissures à faire et les connexions à préparer avec leur numérotage. Le modèle est suspendu contre un mur sous les yeux des ouvriers, qui n'ont qu'à le copier : ils placent d'abord les câbles principaux les uns à côté des autres sur un chevalet, les numérotent à l'aide de fiches en métal et les immobilisent par des pinces en bois; puis ils font les épissures et les recouvrent de ruban caoutchouté; ils numérotent les câbles perpendiculaires; enfin, ils détachent les câbles, les assemblent en un paquet cylindrique, soigneusement ficelé, et les enfilent ainsi réunis dans des fourreaux de toile préparée, qui leur servent d'enveloppe. Le tout est ensuite passé au vernis isolant P. et B. Grâce à ce procédé, deux ouvriers sans instruction spéciale peuvent faire par

jour jusqu'à huit câbles de ce genre, prêts à être mis en place. Le fil de terre est isolé à part en dehors du fourreau.

On a constaté aux États-Unis, spécialement sur les chemins de fer électriques, une usure assez rapide des câbles aux points où ils pénètrent dans la carcasse des moteurs. Il est bon d'éviter cette cause de détérioration en ajoutant à chaque moteur, suivant le dispositif adopté sur les automobiles du New York, New Haven and Hartford R.R., une boîte de connexions (fig. 743) dans laquelle les câbles de a voiture sont réunis par des manchons ad hoc à des câbles courts sortant du moteur.

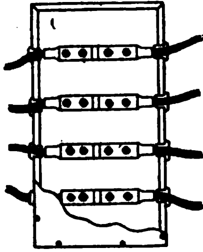


Fig. 743. — Boîte de connexions pour les câbles allant au moteur.

Rappelons enfin, comme recommandation d'ordre général, qu'il faut toujours, pour éviter les accidents dans la remise, retirer le trôlet du fil, si celui-ci est relié au réseau à 500 volts, ou sinon laisser les lampes en circuit ; on devra donc, en tout cas, fermer le circuit d'éclairage.

Usure et frais d'entretien. — Il est extrêmement difficile de se procurer des renseignements précis concernant l'usure et les frais d'entretien des différentes parties de l'équipement électrique. D'une part, en effet, les comptes des compagnies portent, en général, sur l'ensemble des moteurs ou des équipements ; d'autre part, on rencontre souvent d'une exploitation à l'autre d'énormes différences dans l'usure des organes, qui sont dues non seulement à leur fabrication, aux conditions locales, au service fourni, mais surtout au soin très inégal apporté à leur conduite et à leur entretien.

Rien que pour les réparations d'armatures, certaines compagnies dépensent cinq fois plus que d'autres : les surcharges produisant des courts-circuits sont, en effet, souvent causées par la maladresse des mécaniciens ; en outre, comme le bobinage des induits est une question de soin autant que d'habileté, un moment d'inattention de la part de l'ouvrier peut suffire à déterminer un point faible, que les essais effectués avant la mise en service ne décèlent pas toujours.

Les progrès réalisés durant ces dernières années dans la construction des différentes parties de l'équipement électrique ont naturellement eu pour résultat de réduire notablement les frais d'entretien.

Comme terme de comparaison, nous reproduisons ci-dessous, d'après MM. Crosby et Bell [1], un tableau donnant les durées et

[1] *The Electric Railway*, p. 318.

coûts d'entretien moyens des différents organes sujets à l'usure des moteurs de l'ancien type, à deux paires d'engrenages découverts; les chiffres de ce tableau ont été relevés sur des parcours de plusieurs millions de kilomètres, effectués dans de bonnes conditions d'entretien.

ORGANES	DURÉE en kilomètres.	PRIX d'achat en francs.	COÛT par kilomètre en centimes.
Roue dentée d'essieu.	47 600	37,50	0,078
— intermédiaire.	46 000	31,25	0,067
Pignon —	16 200	33,75	0,210
— d'armature.	13 300	30,25	0,227
Coussinets —	38 950	18,50	0,049
— intermédiaires	56 500	22,00	0,039
	Total.		0,670

Pour les moteurs modernes à simple réduction, les durées des différentes parties sont loin d'être connues aussi exactement. D'après des renseignements que nous a communiqués M. A. Schmid, ingénieur-conseil de la Compagnie Westinghouse, on pourrait compter, dans des conditions favorables de service et d'entretien, sur les chiffres suivants : un train d'engrenages formé d'un pignon en acier forgé et d'une roue en acier coulé, avec dents taillées, tournant dans l'huile et placé sous une voiture faisant de 200 à 250 km. par jour, comme la généralité des voitures de tramways américaines, aurait une durée d'environ 2 ans, correspondant à un parcours total de 120 à 160 000 km.; les roues d'engrenages en fonte s'useraient moitié plus vite que les roues en acier, tout en étant, bien entendu, plus exposées aux ruptures de dents; un collecteur bien établi durerait environ 4 ans (240 à 320 000 km.); un coussinet d'armature ou d'essieu en métal blanc, environ 1 an (60 à 80 000 km.); les segments de régulateur, environ 4 ans (240 à 320 000 km.); les bouts amovibles des frotteurs appuyant sur ces segments, 6 à 12 mois (40 à 80 000 km.).

Ces chiffres nous paraissent élevés, surtout en ce qui concerne les engrenages. Il est vrai que c'est pour ceux-ci que la difficulté d'établir des moyennes est le plus grande, en raison du nombre et

de la diversité des causes qui influent sur leur durée : nature du métal, mode de fabrication, forme des dents, conditions du graissage, maintien de l'alignement des roues dentées, limite d'usure admise, poids des voitures, tracé et profil de la ligne, état de la voie, fréquence des arrêts, etc. Une enquête faite récemment en Amérique auprès de 66 compagnies situées dans 49 villes différentes et employant ensemble plus de 7 000 moteurs, dont les résultats ont été publiés par le *Street Railway Journal* [1], a donné comme parcours moyen des engrenages en acier le chiffre de 95 000 km., correspondant à une durée de 14 à 18 mois, et pour les engrenages en fonte une durée moitié moindre. Voici, d'autre part, les chiffres indiqués par la Compagnie Thomson-Houston pour la durée moyenne des différentes parties de l'équipement électrique des voitures (en supposant toujours un parcours journalier de 200 à 250 km. par jour, chiffres habituels en Amérique, mais de 50 à 60 p. 100 trop élevés pour la plupart des lignes européennes) : roues et pignons d'engrenages en acier, 10 à 12 mois ; collecteurs, 1 an à 18 mois ; coussinets d'essieu, 4 à 6 mois ; frotteurs et extrémités amovibles des segments de régulateur, 6 à 12 mois ; balais en charbon, 1 mois. Ces données sont corroborées par des constatations faites sur plusieurs grands réseaux américains, notamment sur celui de la Consolidated Traction Co. du New Jersey [2] : cette compagnie possède 700 voitures, dont 105 à bogies, et 529 équipements doubles, comprenant des moteurs G. E. 800 et G. E. 1 200 et des moteurs Westinghouse n° 3 ; chaque moteur est essayé une fois par semaine au voltmètre et visité complètement sur la fosse tous les 40 jours ; les roues d'engrenages en acier durent un peu moins d'un an, et les roues en fonte, moitié moins ; les pignons en acier, de 4 à 8 mois, les coussinets d'armature en métal blanc, de 3 à 6 mois (15 à 30 000 km.), ceux d'essieu, de 6 à 8 mois (30 à 50 000 km.), suivant le type de voiture, et les balais en charbon, environ 20 jours (4 500 km.).

Le reste de l'équipement électrique ne subit pas d'usure proprement dite. L'isolement des enroulements inducteurs et induits s'affaiblit à la longue ; les premiers peuvent néanmoins durer 4 à

[1] Octobre 1896.
[2] *Street Railway Journal*, août 1896.

6 ans et les seconds 3 à 4 ans, sauf accident, s'ils sont bien construits et surtout si les fils sont soustraits aux vibrations qui ont pour effet de les cristalliser rapidement (voir p. 348). Le rhéostat et les câbles conducteurs ne s'usent pas non plus.

En ce qui concerne le coût d'entretien, les grandes maisons de construction garantissent d'ordinaire un certain maximum de dépense par voiture-kilomètre pour l'entretien et les réparations, renouvellement non compris, des divers appareils et fournitures. Cette garantie est généralement, en Europe, de 1 centime pour l'ensemble de l'équipement électrique des voitures et de 1,5 centime pour la caisse et le truck. Mais, en prévision des augmentations possibles après expiration du délai de garantie par suite d'usure normale ou d'accident, nous croyons prudent d'évaluer plus largement les frais d'entretien, en comptant par exemple 4 à 5 centimes pour l'ensemble. Si l'on trouve, en effet, quelques lignes sur lesquelles ces frais sont inférieurs aux premiers chiffres cités, on en trouve davantage sur lesquelles ils sont supérieurs, témoin les exploitations de Lyon-Oullins et de Marseille, où l'entretien de l'équipement électrique seul revient à plus de 5 centimes par voiture-kilomètre.

Comme exemple de la façon dont se répartissent les frais d'entretien entre les différentes parties du matériel roulant, nous donnons ci-après le détail de la dépense d'entretien des voitures du tramway de Marseille, pendant les mois d'avril et mai 1894, pour un parcours mensuel total de 55000 à 60000 km. :

	Dépense par voiture-kilomètre en centimes.	
	mai 1894	juin 1894
Entretien des appareils de prise de courant	0,35	0,57
— régulateurs	0,61	0,83
— rhéostats et des câbles	1,25	0,89
— moteurs	3,47	3,75
— voitures et collisions	3,89	3,03
Divers	—	0,12
	9,57	9,19

Bien que la dépense ne soit donnée que pour deux mois, elle représente approximativement la moyenne obtenue pendant l'année; plus de 60 p. 100 du total sont absorbés par la main-d'œuvre.

Nous pouvons encore citer la répartition des dépenses d'entretien du matériel roulant sur les tramways bruxellois et les tramways de Hanovre pour

l'année 1895 ; mais ici l'exploitation se fait en partie par trains de deux voitures et les comptes des compagnies ne permettent pas de subdiviser tous les chefs de dépense en leurs éléments afférents aux voitures motrices et aux voitures remorquées ; nous sommes donc obligés de donner la dépense moyenne en bloc par train-kilomètre :

TRAMWAYS DE HANOVRE

Nombre de trains-kilomètres parcourus. 1 099 351
— voitures-kilomètres parcourues 1 112 925

	Dépense moyenne par train-kilomètre en centimes.
Entretien des appareils de prise de courant.	0,263
— de l'équipement électrique proprement dit (moteurs, régulateurs, interrupteurs, câbles, etc.)	0,400
— des transmissions	0,913
— appareils d'éclairage.	0,050
— roues et essieux	1,088
— boîtes à graisse	0,262
— châssis de trucks	0,150
— freins.	0,150
— caisses	0,087
— de l'aménagement intérieur	0,012
Peinture et vernissage.	0,175
Divers.	1,400
	4,950

TRAMWAYS BRUXELLOIS

Nombre de trains-kilomètres parcourus. 816 017
— voitures-kilomètres simples parcourues. 57 285

Matières.	Dépense moyenne par train-kilomètre en centimes.
Entretien des appareils de prise de courant.	0,165
— accessoires (régulateurs, câbles, appareils d'éclairage, etc.)	0,133
— moteurs { Induits.	0,580
— moteurs { Inducteurs	0,228
— transmissions.	0,680
— roues et essieux	0,800
— trucks, freins, etc. (voitures motrices).	0,230
— trucks, freins, etc. (voitures remorquées).	0,024
Total.	2,840
Main-d'œuvre.	0,243
Total général .	3,083

§ 3. — Essais des moteurs de traction

Généralités. — On peut essayer les moteurs à deux points de vue différents : avant leur mise en service, pour vérifier s'ils sont de bonne construction et répondent bien aux conditions prévues, et en service, dans le but de s'assurer qu'ils sont en bon état et de rechercher, s'il y a lieu, les avaries.

Le premier genre d'essais comporte d'une part des *mesures de fonctionnement* (mesures d'effort moteur, de puissance et de rendement en fonction du courant, de température), de l'autre des *mesures au repos* (mesures de résistance et d'isolement) ; ce sont ces dernières qui doivent être effectuées également lors des essais périodiques. Nous examinerons séparément ces deux catégories d'essais, en supposant qu'on dispose d'une source d'électricité au même voltage que celui des moteurs.

I. — Essais de fonctionnement

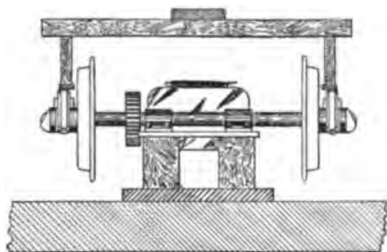
Les essais de fonctionnement sont souvent restreints à la mesure de la puissance et du rendement en marche normale. Mais il vaut mieux, si l'on a le temps, vérifier complètement les conditions de marche en traçant expérimentalement les courbes d'effort et de vitesse en fonction du courant.

Mesures de couple et de vitesse. — Ces mesures peuvent se faire de plusieurs façons que nous exposerons très sommairement, en nous plaçant au point de vue exclusif des moteurs de traction. On opère, en général, sur des moteurs non montés, mais munis de leurs engrenages.

1° Le moyen le plus direct consiste à faire tourner le moteur en l'alimentant à la tension normale et à mesurer à l'aide d'un frein de Prony le couple produit. Si le frein est appliqué à une poulie montée sur l'arbre à la place du pignon, on obtient la puissance du moteur seul; mais il est préférable de mesurer le travail produit sur l'essieu, engrenages compris, en plaçant le moteur avec son essieu monté sur une plate-forme étroite surhaussée, laissant aux roues toute liberté de tourner, et calant le frein sur une de ces roues. La même

disposition permet, lorsqu'on laisse le moteur en place sur le truck, d'étudier le fonctionnement des boîtes à graisse, comme le montre la figure 744.

Nous ne décrirons pas ici les différentes formes bien connues du frein de Prony, qu'on trouvera dans tous les traités de mécanique ou d'essais de machines [1] ; les plus simples sont les meilleures, à condition qu'elles présentent une stabilité d'équilibre suffisante. Il est bon de munir le frein d'un régulateur de serrage automatique [2].

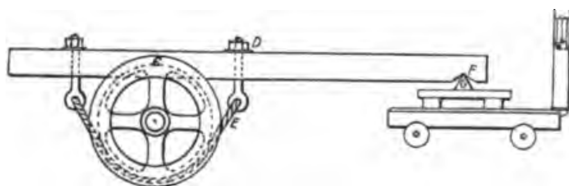


Fig, 744. — Dispositif pour l'essai d'un moteur et des boîtes à graisse.

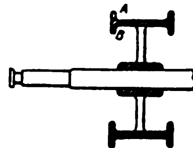
On place sur le plateau du frein des poids variés et l'on serre chaque fois l'appareil de façon à produire le soulèvement de ces poids jusqu'au repère ; la somme des moments du frein et des poids représente le couple moteur produit sur l'essieu, toutes pertes déduites ; on mesure d'autre part la vitesse de l'essieu ou du moteur à l'aide d'un compteur de tours ordinaire ou d'un indicateur de vitesse et le courant consommé à l'aide d'un ampèremètre. On a alors les éléments nécessaires pour tracer les courbes de couple et de vitesse et en déduire les puissances et les rendements.

Au lieu du type primitif de frein de Prony auquel nous venons de faire allusion, on préfère généralement aujourd'hui des dispositifs dans lesquels on remplace les poids par une balance ou un dynamomètre de traction.

La figure 745 représente, par exemple, un appareil employé dans quelques



Elévation d'ensemble du frein.



Coupe transversale de la poulie.

Fig. 745. — Frein de Prony à balance.

ateliers américains. Le frein proprement dit est formé d'une poulie à gorge qu'on cale sur l'arbre du moteur et qu'on serre à l'aide d'un boulon D entre un madrier CF et une courroie en coton E ; l'extrémité F du madrier est entaillée en triangle et repose sur un couteau placé sur le plateau d'une bascule ordinaire ; celle-ci mesure l'effort appliqué au point F, qu'on fait varier plus ou moins par le serrage de la courroie. On a soin de lubrifier la gorge de la poulie pour assurer un frottement uniforme et une pression constante sur

[1] Voir en particulier Éric Gérard, *Mesures électriques*, p. 44, et Picou, *Traité des machines dynamo-électriques*, p. 300.

[2] M. Ringelmann a présenté en 1896 à la Société d'encouragement un excellent modèle de ce genre qui permet des essais très prolongés et précis.

la balance; on refroidit, d'autre part, cette poulie en projetant de l'eau à l'intérieur de la jante.

Cet appareil peut être encore simplifié en employant une simple courroie

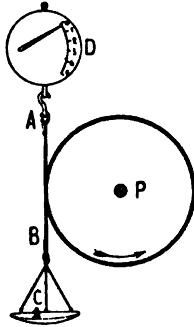


Fig. 746. — Frein de Prony à dynamomètre.

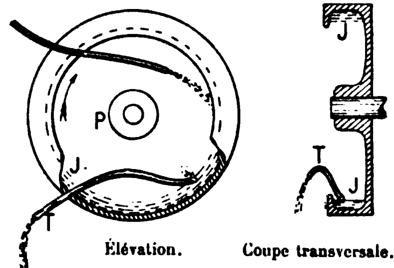


Fig. 747. — Dispositif Mélotte pour le refroidissement du frein de Prony.

tendue sur la poulie par un poids et retenue par un dynamomètre de traction qui mesure l'effort appliqué à la jante (fig. 746).

On obtient une bonne circulation d'eau au moyen du dispositif de la figure 747, dû à M. Mélotte[1] et dans lequel un tuyau recourbé T, fixé à un support extérieur, recueille près de la jante l'eau qui y est rassemblée par la force centrifuge.

Le montage du moteur avec les appareils de mesure et accessoires est donné plus loin par la figure 765 (p. 379) où l'on réunira le voltmètre aux balais.

2° Pour éviter la manipulation du frein de Prony, les grandes compagnies de traction américaines préfèrent le remplacer par un moteur M_2 (fig. 748), muni d'un faux essieu E et de sa roue dentée r, et fonctionnant comme génératrice ; on monte ce second moteur à côté de celui à essayer M_1, auquel on fait attaquer symétriquement la roue dentée r. Le moteur M_1 est relié à la ligne et le moteur M_2 est fermé en court-circuit sur un rhéostat R; en réglant la résistance de R, on fait varier le courant I_2 et par suite le couple résistant de M_2 suivant une loi connue par un tarage préalable ; il suffit donc de lire, pour chaque valeur de la résistance, les intensités du courant à deux ampèremètres A_1 et A_2 et de mesurer les vitesses de rotation pour avoir tous les éléments du fonctionnement du moteur essayé M_1.

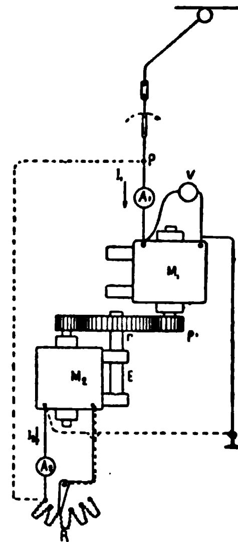


Fig. 748. — Montage d'un essai de moteur avec un second moteur faisant frein.

Lorsqu'on emploie deux machines semblables, on peut, comme l'ont indiqué MM. Fontaine et Cardew, se dispenser de tout tarage et calculer le rendement d'après les formules indiquées plus loin (p. 369).

[1] *Bulletin de l'Association des Ingénieurs de l'Institut Montefiore*, mars 1893.

3° Au lieu d'un moteur taré, on peut employer pour M_2 une dynamo quelconque, à la seule condition de placer entre M_1 et M un dynamomètre de transmission. On emploiera de préférence des dynamomètres optiques, tels que ceux de M. Mascart et de M. Bedell, qui conviennent très bien à ce service. Ce dernier type, qu'on peut aisément exécuter, se compose (fig. 749) de deux plateaux réunis par des ressorts et munis de fentes courbes X, X' symétriques, qui se recoupent à des distances de l'axe variables suivant le déplacement angulaire. En marche, on voit apparaître un cercle blanc, et il suffit de voir le point où ce cercle coupe une échelle transparente MN à graduation empirique placée suivant un rayon, pour lire le couple transmis.

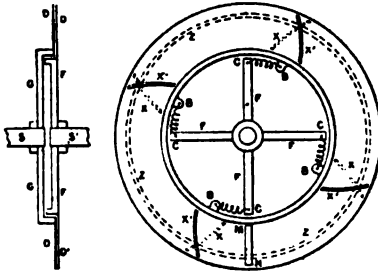


Fig. 749. — Dynamomètre de transmission de M. Bedell.

Quand on recourt à un rhéostat, on l'utilise en général à chauffer l'étuve où l'on sèche les bobines d'inducteurs et les induits, de sorte que l'énergie dépensée n'est pas perdue.

D'autres exploitants préfèrent renvoyer à la ligne l'énergie produite par la dynamo M_2, en remplaçant le circuit en traits pleins de la figure 748 par le circuit représenté en pointillé; mais il faut alors exciter les inducteurs de M_2 séparément avec une intensité assez élevée pour que la f. é. m. surpasse celle de la ligne. On ne peut obtenir ce résultat qu'aux vitesses élevées et avec des moteurs à champ peu saturé au régime normal.

Comme le couple moteur en marche diffère très peu du couple statique obtenu avec le même courant (voir p. 72), on peut aussi tracer la courbe des efforts avec le moteur au repos en calant un frein de Prony sur l'essieu et établissant l'équilibre à l'aide de poids.

Il est à remarquer que tous ces essais ne tiennent pas compte des frottements de l'essieu dans les paliers du moteur, qui en marche reçoivent une partie du poids de ce dernier ; on devra donc réunir ces frottements à ceux des boîtes à graisse, en englobant le tout dans le coefficient de traction de l'automobile (chap. XIII). La même remarque s'applique aux mesures de rendement.

Mesures de rendement. — On mesure souvent le rendement sous la charge normale seule ; mais il est bon de le déterminer aussi sous d'autres charges. L'essai de fonctionnement que nous venons d'étudier donne naturellement ce rendement par le rapport de la puissance recueillie sur l'arbre à la puissance électrique con-

sommée. Il nous reste à examiner les méthodes très employées qui permettent de réduire l'énergie dépensée à la valeur même des pertes ; le principe bien connu en est dû au Dr *J. Hopkinson.*

Méthode du Dr Hopkinson. — On emploie deux dynamos semblables D_1 et D_2 (fig. 750), solidarisées par un manchon d'embrayage et accouplées en opposition. On les entraîne à la vitesse normale par un moteur D_3 taré ou muni d'un dynamomètre de transmission, en excitant les inducteurs des deux dynamos séparément à des valeurs l'une un peu supérieure, l'autre un peu inférieure à l'excitation normale, de façon à reproduire dans le circuit le courant normal. Puis on mesure à l'aide du voltmètre V et de l'ampèremètre A la tension com-

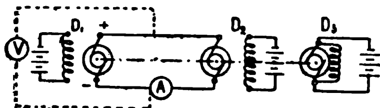


Fig. 750. — Schéma de la méthode du Dr Hopkinson.

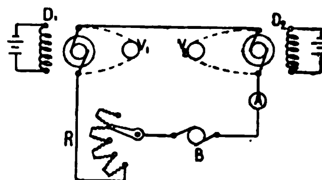


Fig. 751. — Schéma de la méthode de M. Potier.

mune aux bornes des deux induits U et leur courant I ; on mesure à part les pertes par effet Joule dans les inducteurs p_1 et p_2 ; le moteur D_3 donne les autres pertes p'. En admettant que les frottements et les pertes intérieures des deux machines soient égaux, la valeur du rendement de chacune est donnée par la formule approchée

$$\eta = \sqrt{\frac{UI - \frac{p'}{2}}{UI + \frac{p'}{2} + p_1 + p_2}}.$$

Méthode de M. Potier. — M. *Potier* remplace la mesure mécanique des pertes par une mesure électrique, en intercalant dans le circuit des deux moteurs D_1 et D_2 une petite dynamo auxiliaire B, un rhéostat R et un ampèremètre A (fig. 751). On excite l'une des dynamos un peu moins que l'autre, en ayant soin que la moyenne des deux excitations reste égale à l'excitation normale. Soient E_1 et E_2 les deux forces électromotrices à la vitesse normale ; l'ensemble des deux dynamos se comporte comme un moteur de f. é. m. $(E_1 - E_2)$, tournant à vide sous l'action du courant de la source auxiliaire B. On règle la f. é. m. de cette dernière, la différence $(E_1 - E_2)$ et la résistance R de façon à réaliser à la fois la vitesse et l'intensité de courant normales. On mesure alors les dépenses p_1 et p_2, le courant I, les différences de potentiel U_1 et U_2 aux bornes de chaque dynamo et enfin la différence de potentiel aux bornes extrêmes U par le voltmètre V ; les pertes dans les deux machines (outre l'excitation) sont mesurées par la puissance UI ; on admet qu'elles se partagent également

entre D_1 et D_2. Dans ces conditions, la machine D_1, qui fonctionne en génératrice, a pour rendement

$$\eta_1 = \frac{U_1 I}{U_1 I + p_1 + \frac{UI}{2}}$$

et la machine D_2, qui fonctionne en réceptrice,

$$\eta_2 = \frac{U_2 I - \frac{UI}{2}}{U_1 I + p_2}.$$

Cette élégante méthode a été appliquée notamment aux essais de réception du grand moteur double de 720 chev. construit par MM. Sautter, Harlé et C[ie] pour le bateau sous-marin « Gustave-Zédé ». Elle exige une certaine dextérité pour réaliser l'équilibre [1] et suppose, comme celle d'Hopkinson, qu'on puisse augmenter l'excitation d'un des moteurs de 10 à 20 p. 100 au delà de sa valeur normale. Pour les moteurs saturés, il est nécessaire de recourir à d'autres dispositions, telles que les suivantes, où l'on ne modifie pas le champ magnétique.

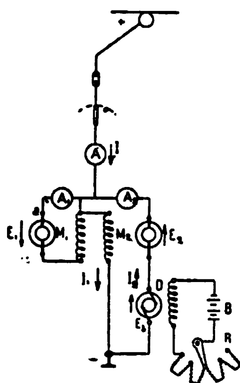


Fig. 752. — Méthode de M. Hutchinson appliquée à des moteurs en série.

Méthode de M. Hutchinson. — Au lieu de faire passer le même courant dans les induits avec des excitations différentes, on peut inversement donner la même excitation aux inducteurs et employer des courants différents dans les induits. Le schéma de la figure 752, qui s'applique à deux moteurs excités en série, indique le montage de cette expérience, dont l'idée première appartient à M. *Hutchinson* [2]. Les deux moteurs semblables à essayer M_1 et M_2 sont, comme précédemment, manchonnés ensemble et placés en parallèle par rapport au réseau de distribution (ou à une génératrice à 500 volts); on monte les deux inducteurs en série avec l'un des induits de façon que l'excitation des deux moteurs soit la même. L'un d'eux M_1 fonctionne en réceptrice, l'autre M_2 en génératrice; pour que M_2 puisse renvoyer son courant au réseau, on lui adjoint un survolteur D, à excitation indépendante, dont la f. é. m. E_3 s'ajoute à la sienne E_2.

[1] Cf. J. Rey, Sur la mesure du rendement industriel d'un moteur électrique de 720 chev., *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens*, juin 1894. M. Rey a donné une théorie plus complète de cette méthode, dans laquelle il tient compte de la répartition légèrement inégale de la perte UI entre les deux machines ; l'accord avec l'expérience a été des plus satisfaisants. Mais pour les moteurs de traction, il suffit très bien de supposer la perte égale à $\frac{UI}{2}$ pour chaque moteur.

Cette méthode et la suivante exigent une dynamo auxiliaire construite spécialement

[2] *The Electrical Engineer*, 1893. — Nous donnons ici une démonstration différente et beaucoup plus simple.

La même méthode s'applique aux moteurs en dérivation en les excitant séparément.

Soient R la résistance de chacun des inducteurs, r celle de chacun des induits, U la différence de potentiel aux bornes extrêmes du moteur M_1, I, I_1, I_2 les courants, total et partiels, mesurés par les ampèremètres A, A_1, A_2.

Les f. é. m. des deux induits sont les mêmes :

$$E_1 = E_2 = U - (R + r) I_1.$$

La puissance électromagnétique dans M_1 est $E_1 I_1$ et la puissance électromagnétique dans M_2 est $E_2 I_2 = E_1 I_2$; si l'on admet que les pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault sont les mêmes pour les deux armatures, la puissance sur l'arbre commun est la moyenne

$$\frac{E_1 (I_1 + I_2)}{2} = [U - (R + r) I_1] \left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right).$$

La puissance fournie aux bornes du moteur M_1 étant UI_1, on obtient pour le rendement l'expression

$$\eta = \frac{[U - (R + r) I_1] (I_1 + I_2)}{2 UI_1}$$

$$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{I_2}{I_1} - (I_1 + I_2) \frac{R + r}{U}\right].$$

Cette formule reste applicable si l'on excite les inducteurs de M_2 par une source extérieure, pourvu qu'on y fasse passer un courant égal à I_1 [1].

A titre d'exemple d'application de cette méthode, voici les résultats d'un essai de M. Hutchinson sur deux moteurs Sprague n° 6, avec les trois galettes en parallèle :

$$I_1 + I_2 = 50 \text{ ampères},$$
$$\frac{I_2}{I_1} = 0,70 \text{ —}$$
$$R + r = 1,9 \text{ ohms à froid},$$
$$= 2,3 \text{ — à chaud}.$$
$$\text{D'où } \eta = 75,5 \text{ p. 100 à froid},$$
$$= 73,5 \text{ — à chaud}.$$

La même formule reste applicable si, au lieu de récupérer l'énergie du moteur M_2, on la consomme dans des résistances, comme nous l'avons indiqué plus haut (p. 365), suivant le schéma de la figure 753 ; le courant I_2 se règle à l'aide d'un rhéostat qui peut être celui d'une voiture ; ce réglage est plus facile que dans les dispositifs précédents.

Cette méthode des courants inégaux est assez simple. Il faut seulement éviter les erreurs sur la valeur de $(R + r)$ en mesurant très vite cette résis-

[1] Cette modification permet de réaliser pour la tension aux bornes U la tension même du réseau, tandis que le montage représenté introduit une petite différence de quelques centièmes, qu'on peut, il est vrai, racheter par une augmentation égale de voltage au tableau de l'usine.

tance avant que la température des enroulements ne se modifie. Une erreur de graduation des ampèremètres n'influe pas sur le rapport $\frac{I_1}{I_2}$ et ne modifie le troisième terme (terme correctif, toujours petit) que d'une façon négligeable. Il n'est pas nécessaire non plus que les f. é. m. E_1 et E soient rigoureusement égales, ni, par suite, les vitesses, car la différence n'influe que sur le troisième terme de la formule. On peut donc appliquer le procédé de la figure 753 à la mesure du rendement d'un équipement de voiture sans démonter les moteurs: il suffit de soulever le truck de façon à rendre les roues libres et de monter sur les essieux des poulies provisoires permettant de les solidariser par une courroie. Mais les chiffres ainsi obtenus engloberont cette fois les frottements

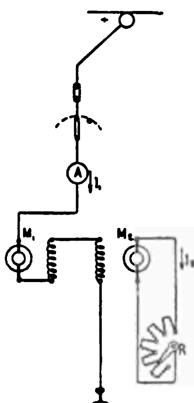


Fig. 753. — Méthode sans récupération.

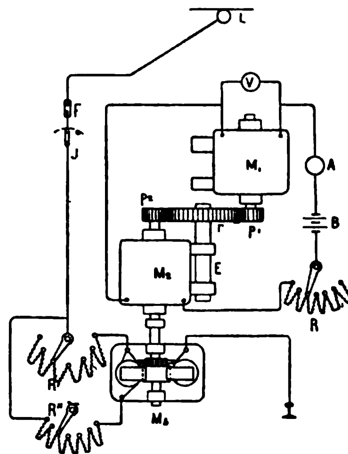


Fig. 754. — Méthode de A. Blondel.

des essieux dans les paliers et les boites à graisse, sans compter les pertes de la transmission par courroie; on trouvera donc des rendements approchés par défaut.

Le point faible de cette méthode, c'est qu'elle suppose les pertes par hystérésis et courants de Foucault fonction seulement de l'excitation et de la vitesse, tandis qu'une réduction de 20 à 30 p. 100 de l'intensité I_2 par rapport à I_1 peut les modifier d'une façon assez sensible par l'effet de la réaction d'induit.

Telle qu'elle est cependant, elle nous parait satisfaisante et supérieure à celle proposée par Lord Rayleigh et M. Kapp [1], qui en diffère par l'absence du survolteur et nécessite l'emploi non seulement de courants inégaux, mais encore d'excitations différentes.

Méthode de A. Blondel. — On peut, comme l'a proposé l'un de nous, perfectionner la méthode Hopkinson et supprimer toute difficulté de réglage en donnant aux deux moteurs M_1 et M_2, solidarisés ensemble et entrainés par un moteur M_3 taré ou mieux muni d'un dynamomètre (fig. 754), des excitations égales, par exemple en les couplant en série; il suffit d'ajouter dans le circuit une

[1] Cf. Éric Gérard, *Mesures électriques*, p. 387.

batterie d'accumulateurs de 80 à 100 volts au plus (qui peut être remplacée par un petit transformateur tournant à f. é. m. variable, alimenté par le réseau) et un rhéostat R. On règle celui-ci et la f. é. m. de la source auxiliaire de façon à réaliser le courant normal; puis on règle l'excitation en shunt du moteur M_3 jusqu'à ce que la vitesse soit la vitesse normale de régime, préalablement déterminée. Soient U la tension entre les bornes extrêmes de M_2 et de M_1, U_1 la tension aux bornes de chacun des moteurs, I le courant qui les traverse, p la puissance mécanique fournie par M_3. La puissance UI représente la perte par effet Joule dans les deux machines étudiées et p les autres pertes.

Le moteur qui joue le rôle de réceptrice consomme à ses bornes $U_1 I$ et donne sur l'arbre la même puissance diminuée de la moitié des pertes totales, c'est-à-dire

$$U_1 I - \frac{UI}{2} - \frac{p}{2}.$$

Le rendement a donc pour expression

$$\eta = 1 - \frac{UI + p}{2\,U_1 I}.$$

Ce dispositif exige peu de tâtonnements, il s'applique à tous les régimes de courant et ne nécessite pas de mesures de résistance. Il permet de séparer facilement les pertes : la perte $\frac{UI}{2}$ représente l'effet Joule dans l'induit et l'inducteur; en faisant tourner les moteurs à circuit ouvert à la même vitesse que plus haut, la puissance fournie par M_3 représente la perte par frottements dans les paliers et les engrenages; enfin, en retranchant ces deux pertes de la perte $\frac{p}{2}$ mesurée ci-dessus, il reste la perte par hystérésis et courants de Foucault.

Notre méthode s'applique d'ailleurs, ainsi que les précédentes, aux moteurs excités en dérivation, à la seule condition de faire l'excitation séparément et de tenir compte de l'énergie ainsi dépensée.

Méthode indirecte de M. Swinburne et de M. Housman. — Au lieu des méthodes directes précédentes, on emploie encore souvent le procédé indirect de M. *J. Swinburne*, qui consiste à mesurer à part les frottements et les pertes par hystérésis et courants de Foucault, en faisant tourner à la vitesse normale le moteur avec ses engrenages à vide et lui donnant son champ magnétique normal par excitation séparée. Le courant i consommé dans l'armature, à ce régime, est beaucoup plus faible que le courant normal I_a, de sorte que la tension aux bornes, égale à U en régime normal, doit être réduite à $U - r_a(I_a - i)$ La puissance consommée par les pertes à vide, non compris l'effet Joule, est

$$p = (U - r_a I_a)\, i.$$

Soient r_i la résistance des inducteurs et J le courant excitateur; le rendement sous charge correspondant au courant I_a a évidemment pour expression

$$\eta = \frac{UI_a - r_a I_a^2 - p}{UI_a + r_i J^2}.$$

On peut ainsi évaluer le rendement à toute charge.

Cette méthode est susceptible d'une certaine précision [1], parce que l'erreur relative porte seulement sur les pertes ; celles-ci sont appréciées un peu par défaut, parce qu'on néglige la réaction d'induit qui les augmente, mais avec les moteurs de traction à faible réaction la différence est petite [2].

Elle permet aussi, comme l'a indiqué M. *Housman*, de séparer les pertes par courants de Foucault des pertes par frottements et hystérésis. Il suffit, tout en maintenant l'excitation constante, de faire varier la tension aux bornes et, par suite, la vitesse qui lui est sensiblement proportionnelle. Les pertes par courants de Foucault varieront proportionnellement au carré de la vitesse, tandis que les autres varieront simplement comme la première puissance; en divisant les pertes brutes par les vitesses n correspondantes, on trouve donc une loi linéaire [3].

$$\frac{p}{n} = A + Bn,$$

qui se représente par une droite dont l'ordonnée à l'origine et le coefficient angulaire donnent les coefficients A et B; on peut ainsi séparer immédiatement les deux pertes An et Bn^2. Les frottements se déterminent comme plus haut.

Mesures de température. — La température des moteurs de traction en marche prolongée est un des éléments essentiels de leur bon fonctionnement et nous verrons plus loin comment elle intervient dans leur spécification. Dans les appareils bien construits, cette température peut s'élever beaucoup et atteindre momentanément sans inconvénient, comme on l'a vu au chapitre v (t. I, p. 165), 80° au-dessus de la température ambiante ; mais il s'agit ici de la température intérieure moyenne des enroulements ; la température extérieure est moindre et ne doit pas dépasser de plus de 60 à 70° la température ambiante.

La température extérieure peut être appréciée approximativement à l'aide d'un thermomètre qu'on applique sur l'enroulement en le recouvrant extérieurement d'une touffe d'ouate pour arrêter le rayonnement; il est bon de chauffer préalablement ce thermomètre au voisinage de la température à mesurer, pour obtenir rapidement l'équilibre dès l'arrêt du moteur.

L'élévation de température intérieure se détermine plus exactement en mesurant la résistance des enroulements à froid r_0, puis leur résistance à chaud r, d'après les méthodes indiquées ci-dessous ; la formule

$$r = r_0 [1 + 0{,}0039 (t - t_0)]$$

[1] On verra dans les annexes que cette méthode est celle qu'a adoptée l'administration des chemins de fer de l'Etat belge pour la réception de ses moteurs compound.

[2] Cependant, dans les moteurs dont le rendement propre est inférieur à 0,90 les pertes dans le fer peuvent être notablement différentes à vide et en charge.

[3] Voir les formules (18, et (20) (p. 72).

donne alors

$$t - t_0 = \frac{r - r_0}{0,0039\ r_0}.$$

II. — Mesures au repos

Mesures d'isolement. — Les mesures d'isolement peuvent être faites soit pour vérifier la bonne construction d'une armature ou d'une bobine avant de la mettre en service, soit pour apprécier après un certain temps de fonctionnement comment se conserve l'isolation des appareils.

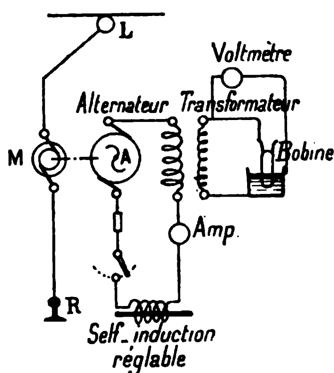


Fig. 755. — Dispositif pour essais d'isolement à haute tension.

Mesures en cours de construction. — Pour une bobine neuve ou une section d'armature neuve le meilleur essai d'isolement consiste, une fois qu'elle est bien sèche, à relier l'âme de la bobine et la masse en fer qui la porte aux deux pôles d'une source de courants alternatifs à la tension de 4 à 5 000 volts, suivant une disposition telle que celle de la figure 755. On maintient cette tension pendant quelques instants. Toute bobine imparfaitement isolée aura son isolement crevé ; celles qui résistent sont bonnes.

Si les sections ne sont pas montées sur leurs noyaux, on peut les plonger dans un bain de mercure qu'on relie à l'un des pôles, comme le montre la figure; mais on risque ainsi de réduire l'isolement.

On peut aussi employer l'un des procédés suivants.

Mesures en service. — Les bobines et l'armature perdent peu à peu leur isolement par suite soit d'échauffement exagéré, soit simplement d'usure mécanique de l'isolant, et un essai à haute tension les mettrait prématurément hors d'usage. On doit alors mesurer l'isolement à bas voltage par l'une des méthodes ordinaires, pont de Wheatstone, méthode de comparaison, etc., ou

par des méthodes simplifiées évitant l'emploi d'appareils trop délicats qui ne seraient pas à leur place dans un atelier de réparations.

On peut, en premier lieu, employer un des appareils connus sous le nom d'ohmmètres, qui sont spécialement destinés à ce genre de mesures.

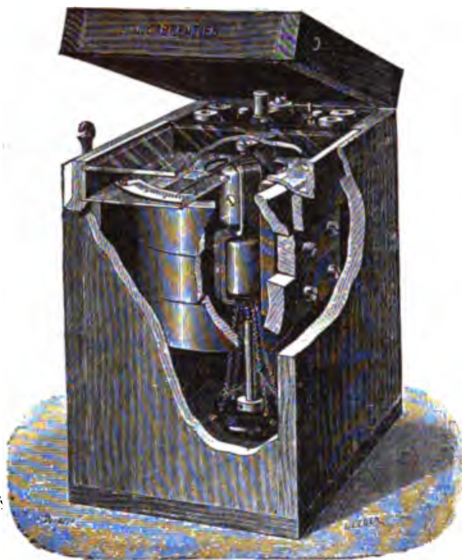


Fig. 756. — Ohmmètre Carpentier.

L'ohmmètre de *Carpentier* (fig. 756), par exemple, est un galvanomètre Deprez-d'Arsonval muni de deux équipages mobiles portés, ainsi qu'un index, par un même axe vertical pivotant entre deux pointes dans des chapes en agate et recevant les courants par des boudins en fils flexibles. Les deux bobines mobiles calées à angle droit sont alimentées en dérivation par une source d'électricité (ordinairement une petite machine magnéto-électrique qui accompagne l'appareil et peut donner jusqu'à 120 volts lorsqu'on la fait tourner à la main) ; on met en série avec l'une des bobines la résistance à mesurer et avec l'autre une résistance



Fig. 757. — Ohmmètre portatif Chauvin et Arnoux.

fixe connue. Sous l'influence des courants qui traversent ces deux équipages, l'ensemble prend une certaine position d'équilibre qui donne, d'après une graduation empirique, la valeur du rapport des deux résistances.

Un autre appareil du même genre, celui de *Ducretet*, est un simple galvanomètre accompagné de shunts variés et d'une grande résistance de comparaison. On compare, suivant une méthode bien connue, les déviations obtenues en

intercalant successivement en série avec le galvanomètre cette résistance, puis la résistance à mesurer.

L'ohmmètre *Chauvin et Arnoux* (fig. 757) est un pont de Wheatstone à fil divisé, d'une forme particulière, combiné avec un galvanomètre apériodique très sensible. Une des quatre branches du pont est formée par la résistance à mesurer X (fig. 757 *bis*), l'autre par une résistance de comparaison r (qui peut être à volonté de 10, 100, 1 000, 10 000 ou 100 000 ohms); le fil divisé, qui forme les deux autres branches, est constitué par un conducteur fin R, très régulièrement enroulé sur un cylindre isolant à l'aide d'un tour à fileter et qui, sur une faible longueur de 40 cm., réalise ainsi une résistance de plusieurs milliers d'ohms ; sur ce rhéostat se déplace un contact commandé par un curseur à index glissant sur une règle divisée ; lorsqu'on l'a placé de façon à ramener le galvanomètre G au zéro, la lecture donne directement le rapport de la résistance cherchée à la résistance de comparaison.

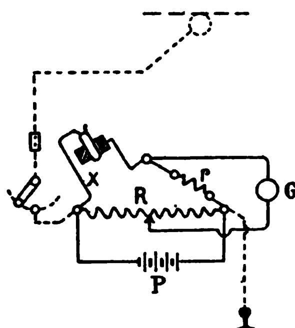


Fig. 757 *bis*. — Schéma de l'appareil précédent.

Cet appareil permet de mesurer des résistances de 0,1 ohm à 20 mégohms avec une pile P de 15 à 20 volts formée de 12 éléments à liquide immobilisé enfermés dans une boîte de mêmes dimensions que l'ohmmètre. Les mesures sont du reste indépendantes des variations de voltage de la source employée ; on peut donc employer l'instrument sous 500 volts, comme le montre le tracé en pointillé, en mettant une résistance en série pour ne pas avoir un courant trop intense dans le rhéostat et les bobines.

La même remarque s'applique aussi aux deux instruments précédents.

A défaut de ces instruments spéciaux, un voltmètre ou un milliampèremètre suffit, comme nous allons l'expliquer, pour ces mesures, étant donnée la faible précision requise.

Soient R la résistance du voltmètre ou milliampèremètre A (fig. 758) jouant le rôle de galvanomètre, x la résistance d'isolement cherchée, r une résistance supplémentaire connue, qu'on peut mettre en série avec le galvanomètre. On branche le voltmètre entre les pôles + et — du tableau de distribution, en intercalant d'abord la résistance r, puis la résistance d'isolement à mesurer ; par exemple, s'il s'agit de l'isolement de l'armature M, on met un pôle sur le collecteur et l'autre sur l'arbre.

Soient V_1 et V_2 les deux déviations lues dans ces deux mesures et U la tension réelle du réseau ; on a, en vertu de la loi d'Ohm,

$$V_1 = \frac{U}{R + r},$$

$$V_2 = \frac{U}{R + x}.$$

D'où par division

$$\frac{R + x}{R + r} = \frac{V_1}{V_2}$$

et

$$x = \frac{V_1}{V_2}(R + r) - R.$$

Dans la seconde mesure, lorsque le défaut d'isolement est considérable, on pourrait risquer d'endommager l'instrument si sa résistance propre R n'était pas suffisante pour lui permettre de supporter seul la tension du réseau. Le mieux est donc d'employer un voltmètre de 550 volts et de supprimer la résistance r ; il reste alors simplement

$$x = \left(\frac{V_1}{V_2} - 1\right) R.$$

Soient, par exemple, un voltmètre de 60 000 ohms, $V_1 = 510$ volts, $V_2 = 25{,}5$ volts ; on aura

$$x = \left(\frac{510}{25{,}5} - 1\right) 60\,000 = 1\,140\,000 \text{ ohms.}$$

Le montage se fait comme l'indique la figure 758 : une clef à deux directions C permet de faire rapidement les deux mesures l'une après l'autre ; un inter-

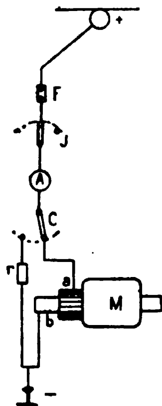


Fig. 758. — Schéma du montage des appareils pour les mesures d'isolement par la méthode du voltmètre.

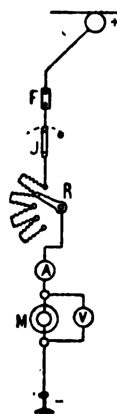


Fig. 759. — Méthode du milliampèremètre.

rupteur J et un coupe-circuit F permettent respectivement d'interrompre et de protéger le circuit ; on peut ordinairement négliger l'erreur résultant des variations du voltage sur la ligne.

En Amérique, cette méthode est très usitée avec emploi du voltmètre *Weston* de 600 volts, qui a pour résistance environ 80 000 ohms. On donne souvent comme consigne aux agents de considérer l'isolement d'un moteur en bloc

comme suffisant tant que l'aiguille reste au-dessous de 200 volts (ce qui correspond à un isolement de 120 000 ohms), et, au-dessus de ce chiffre, d'examiner séparément l'armature et les inducteurs pour rechercher le défaut.

En France, MM. Chauvin et Arnoux construisent d'après le même principe d'excellents *voltmètres-ohmmètres* portant une seconde graduation en ohms qui indique directement les résistances d'isolement cherchées.

Lorsque la résistance d'isolement est faible par rapport à la résistance du voltmètre, celui-ci ne donnerait qu'une indication peu précise et il vaut mieux employer un milliampèremètre de faible résistance, après avoir vérifié qu'il n'y a pas de court-circuit à craindre. Le montage est alors celui de la figure 759 : la tension de la ligne U est lue au voltmètre et le courant de pertes A au milliampèremètre; la résistance d'isolement cherchée est

$$x = \frac{U}{A} 1\,000.$$

Mesures de résistance. — On a couramment à mesurer la



Fig. 760. — Pont portatif Carpentier.



Fig. 761. — Caisse portative Chauvin et Arnoux pour la mesure des résistances.

résistance soit d'une bobine d'inducteurs, soit d'un induit entier entre balais, soit d'une section d'induit.

1° Les deux premières mesures peuvent être exécutées par la méthode ordinaire et classique du pont de Wheatstone. Les ponts portatifs *Carpentier* (fig. 760) et *Chauvin et Arnoux* (fig. 761) peuvent, par exemple, être très commodément employés à cet

usage. Ils comportent une boîte de résistances graduées de 10 000 ohms, un galvanomètre et des résistances de comparaison. Les résistances à mesurer étant souvent très faibles, on peut éliminer les erreurs aux contacts des fils qui les relient au pont en employant l'appareil comme pont double de Thomson.

Plusieurs grandes compagnies américaines emploient couramment le pont de Wheatstone dans leurs ateliers ; mais le plus grand nombre se contentent d'une précision moindre et remplacent ce

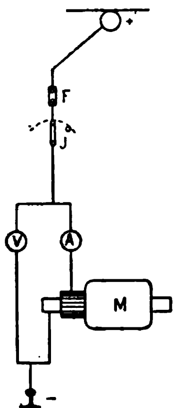


Fig. 762. — Schéma de la méthode potentiométrique appliquée à la mesure de la résistance d'une armature.

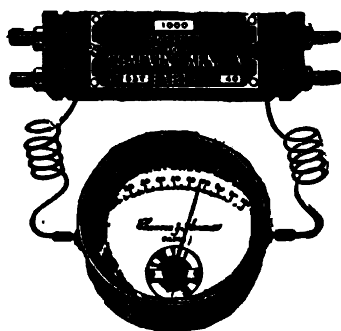


Fig. 763. — Ampèremètre apériodique Chauvin et Arnoux avec son shunt.

dispositif par la *méthode potentiométrique*, qui consiste à mesurer à la fois le courant I qui passe dans la résistance inconnue R et la différence de potentiel U entre les bornes, d'où

$$R = \frac{U}{I}.$$

La figure 762 représente, par exemple, le montage des instruments pour la mesure de la résistance d'un induit entre balais ou d'un inducteur entre bornes ; un coupe-circuit F est intercalé pour protéger la dérivation et un rhéostat R sert à régler le courant. Lorsqu'on mesure la résistance à froid, il est nécessaire de réduire l'intensité bien au-dessous du régime normal pour éviter tout échauffement ; si l'on veut la mesurer à chaud, au contraire, on doit choisir un courant assez intense et attendre que le fil ait pris la température du régime normal. Cette distinction est nécessaire, car on a vu (t. I, p. 165) que la différence entre les résistances à froid et à chaud dépassait souvent 25 p. 100.

Dans un atelier de tramways ordinaire branché sur un réseau à 500 volts,

on peut prendre pour les mesures à chaud un ampèremètre de 50 ampères [1] et un voltmètre de 25 volts, et pour les mesures à froid un ampèremètre de 5 à 10 ampères et un voltmètre de 2 à 5 volts. Les mesures à 10 ampères sont particulièrement commodes. Pour avoir toujours de la précision dans les lectures, on devra employer de préférence des instruments apériodiques à sensibilité variable du genre Weston, dont la figure 763 représente un bon modèle. Il faut en outre un rhéostat capable d'absorber 50 ampères × 500 volts.

Si l'on dispose d'une résistance connue analogue à la résistance à mesurer, on peut l'employer comme terme de comparaison et remplacer l'ampèremètre par un second voltmètre (fig. 764); pour comparer, par exemple, une

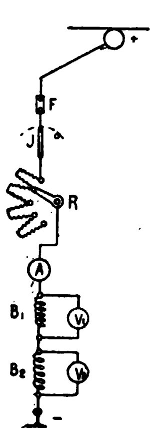


Fig. 764. — Schéma de la méthode potentiométrique avec résistance de comparaison.

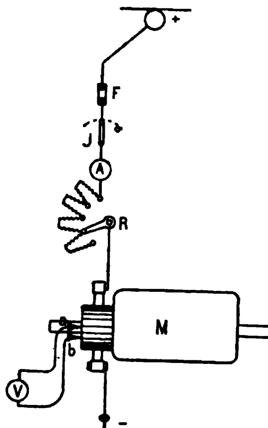


Fig. 765. — Application de la méthode potentiométrique à la mesure de la résistance des sections d'un induit.

bobine d'inducteur B_1 à une bobine semblable B_2 servant d'étalon, on les place toutes deux en série et l'on mesure au même instant les voltages aux bornes de chacune à l'aide des voltmètres V_1 et V_2; les résistances sont dans le même rapport que les lectures [2].

2° Les résistances de sections d'induit peuvent être mesurées comme les résistances précédentes en isolant les extrémités de chaque bobine des voisines; mais cela exige le dessoudage des fils de connexion.

Il est bien préférable d'employer encore la méthode potentiométrique, dont la figure 765 indique le schéma dans ce cas particu-

[1] Valeur extrême de la graduation.

[2] On pourrait n'employer qu'un seul voltmètre en le mettant successivement aux bornes des deux résistances; mais les fluctuations du voltage de la ligne pendant ces opérations peuvent alors occasionner des erreurs.

lier : on envoie dans l'induit, à son état normal, un courant I mesuré par l'ampèremètre A et l'on mesure les volts perdus dans chaque section au moyen d'un voltmètre de 2 volts V, relié aux deux touches du collecteur auxquelles aboutit la section considérée.



Fig. 766. — Terminaison isolante des fils d'un voltmètre à 500 volts.

Dans tous les essais de ce genre, il est bon, pour appliquer plus facilement les bouts des fils, de les terminer par de petites palettes soudées en acier *c* (fig. 766) ; afin de pouvoir les manier sans danger malgré la tension de 500 volts, on les recouvre d'une gaine en bois paraffiné ou d'un bobinage protecteur en ruban isolant et on ajoute un petit disque isolant *b* destiné à retenir les doigts.

Essais rapides. — On peut, sans démonter les moteurs, en effectuer la vérification sommaire dans la remise par les méthodes précédentes. Pour faciliter ce travail, il est commode de réunir les instruments nécessaires dans une boîte munie des câbles convenables et qu'on transporte dans la voiture à essayer.

Un ohmmètre permettant de mesurer dans de bonnes conditions des résistances de 0,1 ohm à plusieurs mégohms répond très convenablement à ce desideratum. On peut de même employer une boîte comprenant (fig. 767) un rhéostat principal en série avec un ampèremètre, un voltmètre-ohmmètre de 550 volts, un commutateur C_1 pour les mesures d'isolement par la méthode potentiométrique et un inverseur C_2 pour les mesures de résistance. L'enroulement à essayer est relié à la borne C_1 ou à la borne voisine de gauche, suivant qu'on veut déterminer l'isolement ou la résistance ; dans ce dernier cas, la chute de potentiel est mesurée à l'aide de deux fils reliés à un second voltmètre de 2 volts,

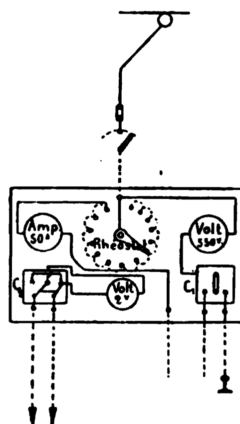


Fig. 767. — Disposition d'une boîte d'essais pour la méthode potentiométrique.

auquel l'inverseur C_2 permet de ne donner qu'un seul sens de déviation.

Au lieu de transporter la boîte, on peut aussi la laisser fixe et la relier successivement par des câbles souples aux équipements des diverses voitures à vérifier; le gros câble destiné à porter le courant de l'ampèremètre peut alors être remplacé par un fil de trôlet supplémentaire placé au-dessus des voies de la remise et dont on capte le courant par la roulette ordinaire ; ce fil pourra être mis hors circuit par un commutateur spécial ou même relié à un circuit d'ohmmètre.

Ces procédés sont très pratiques, surtout celui de l'ohmmètre ou du pont de Wheatstone. Néanmoins, on en emploie souvent d'autres plus rudimentaires pour les mesures grossières d'isolement : par exemple, on remplace le voltmètre par une simple lampe à incandescence de 500 volts, qui ne doit pas rougir si l'isolement est bon, ou par une sonnerie; en Amérique, celle-ci est souvent à armature polarisée *c*, actionnée par une petite magnéto *ab* à courants alternatifs qu'on tourne à la main (fig. 768) ; les ouvriers emploient, par exemple, ce système pour vérifier qu'il n'y a pas de court-circuit entre les touches d'un collecteur avant de le monter, en appliquant les fils *c* et *d* successivement de touche en touche.

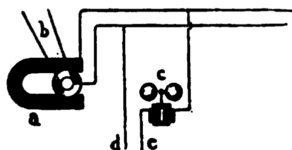


Fig. 768. — Sonnerie polarisée employée dans les ateliers américains.

Un des défauts qu'on a le plus fréquemment à rechercher sur les voitures où s'est produit un dérangement, c'est une rupture de circuit entre le trôlet et les moteurs ou la terre. On la trouve aisément en abaissant le trôlet et plaçant l'un des régulateurs sur le premier cran; on met ensuite un fil de la sonnerie à la terre par la borne de terre du régulateur et l'autre fil successivement sur les diverses bornes de ce régulateur en partant du bas, puis sur les interrupteurs fusibles, etc. : tous ces contacts doivent faire tinter la sonnerie, qu'ils ferment, en effet, par un circuit entièrement métallique; si l'un d'eux ne la fait pas sonner, c'est qu'il existe une rupture entre ce point du circuit et le précédent. Si l'un des régulateurs ne présente pas de défaut, on essaie l'autre. Si

tous deux sont bons, on essaie les autres points du circuit jusqu'à la base du trôlet.

Tous les inspecteurs de tramways doivent être assez familiarisés avec ces méthodes d'essai rapide et avec les détails de l'équipement pour pouvoir trouver rapidement un défaut et y remédier sans retard dès que l'avarie est signalée par le mécanicien. Ils doivent en même temps inspecter fréquemment l'état des écrous de boulons et des connexions de fils des parafoudres, trôlets, fusibles, etc., et les rectifier sans attendre la visite périodique de l'équipement dont nous avons parlé plus haut.

§ 4. — Essais de voitures équipées

Généralités. — Il est particulièrement intéressant pour une compagnie de tramways ou de chemins de fer électriques de recueillir des données précises sur la façon dont se comporte un véhicule ou un train muni de l'équipement normal aux divers points des parcours et de connaître l'énergie totale dépensée. Elle peut y trouver un moyen de vérification et des indications précieuses pour l'amélioration de ses lignes ou de son matériel. Les sociétés de construction retirent, d'autre part, de ces mesures des enseignements non moins utiles en vue de l'établissement d'autres lignes.

Ces essais peuvent être de deux espèces : ou bien on se contente d'étudier en bloc les dépenses d'énergie dans un parcours connu, et alors des mesures électriques accompagnées de mesures de la vitesse suffisent ; ou bien on désire analyser d'une façon détaillée les éléments de ces dépenses, et il devient nécessaire de faire, concurremment aux mesures électriques, des mesures mécaniques plus complètes, portant non seulement sur la vitesse, mais sur l'accélération, l'effort de traction, etc. Dans ce cas, comme la dépense d'énergie à chaque instant dépend des données de construction de la voie, rampes et courbes, il faut en outre repérer à chaque instant la position de la voiture sur la ligne, dont le tracé et le profil en long sont supposés connus.

Les indications que nous allons donner s'appliquent plus parti-

culièrement à la traction *électrique* et nous renvoyons, pour ce qui n'est pas spécial à notre sujet, aux ouvrages relatifs à la traction sur les chemins de fer, où l'on trouvera des exposés plus détaillés.

I. — Méthodes de mesures

Nous nous occuperons successivement des mesures de vitesse, des mesures électriques et des mesures mécaniques.

Mesures de vitesse. — Quel que soit le but des essais (sauf pour la mesure du coefficient de roulement à une vitesse tendant vers zéro), ils comprennent comme élément essentiel et important des mesures de vitesse ; aussi allons-nous commencer par celles-ci.

Méthodes chronométriques. — Sans appareil spécial, un observateur placé sur une voiture peut déterminer approximativement la vitesse en divers points d'un parcours au moyen d'une montre à secondes, en notant la durée t qui s'écoule entre le passage du véhicule devant des repères rapprochés et connus, tels que des poteaux numérotés dont la distance l est donnée par le plan ou peut être relevée au décamètre ; on arrive au même résultat en laissant tomber à côté de la voie à un intervalle de quelques secondes t, mesuré au chronomètre, deux boulettes de plâtre ou de terre glaise, dont on vient ensuite relever la distance l. On obtient ainsi la vitesse

$$V = \frac{l}{t}.$$

Cette méthode rudimentaire peut être perfectionnée par l'observation continue et l'enregistrement des mesures. Pour cela, on fait dérouler d'une manière continue et avec une vitesse constamment proportionnelle à celle de la voiture un cylindre ou une bande de papier sur laquelle s'inscrivent à titre de contrôle les tours de roues (fig. 769) ; un électro-aimant y inscrit d'autre part le temps par des traits tracés à intervalles réguliers ; on obtient les vitesses en mesurant les distances parcourues pendant chacun des intervalles connus ; enfin, un troisième style, mû soit à la

main au moyen d'un cordon, si l'observateur est près de l'appareil, soit par un petit électro-aimant, s'il est placé à l'avant du train, permet de tracer un trait sur la bande au passage des principaux poteaux indicateurs pour repérer plus directement la position du train ou de la voiture sur la ligne parcourue. Le déroulement du papier est commandé par l'un des essieux au moyen d'une transmission à grande réduction de vitesse prise sur une fusée dans la boîte à graisse et comprenant, par exemple, plusieurs vis sans fin.

On peut arriver plus simplement au même résultat à l'aide

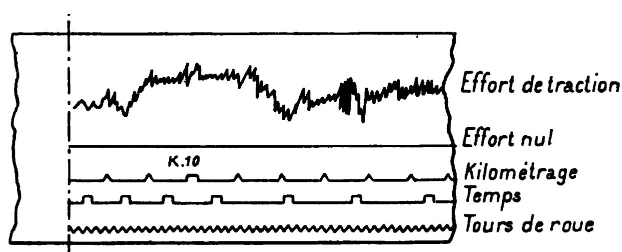


Fig. 769. — Spécimen d'enregistrement chronométrique des vitesses. (Fourgon dynamométrique de la Cie de l'Est).

d'un dispositif inverse, en employant un chronographe enregistreur, tel que celui de *Richard*, qui consiste en un électro-aimant actionné par une pile et un contact électrique placé sur un compteur de tours actionné par l'essieu ; toutes les fois que le circuit est fermé par le contact (qu'on peut placer sur l'un quelconque des axes de 10, 100, 1 000 ou 10 000 tours), la plume de l'enregistreur commandée par l'électro-aimant trace un trait transversal sur le cylindre de papier entraîné à une vitesse uniforme par un mouvement d'horlogerie.

Un autre appareil, dit chronographe totalisateur, peut aussi être employé pour inscrire les distances totales parcourues.

Méthodes tachométriques. — On peut lire directement à chaque instant la valeur de la vitesse à l'aide d'un des nombreux appareils imaginés dans ce but sous les noms de tachomètres, cinémomètres, indicateurs de vitesse, etc. En reliant cet appareil directement ou par courroie à l'un des essieux du véhicule, dont les roues ont un diamètre connu, on lit le nombre de tours, et par suite on connaît la vitesse, qui lui est proportionnelle.

L'un des plus répandus parmi les instruments de ce genre est le cinémomètre *Richard*, dont la figure 770 indique le principe. Le mécanisme est formé de deux plateaux tournant en sens inverses avec une vitesse rendue rigoureusement constante par un régulateur Foucault et faisant rouler entre leurs surfaces un galet Q. Celui-ci est monté sur une vis sans fin qui a pour écrou deux roulettes T et T' à fentes hélicoïdales agissant sur la vis à la façon d'un pignon sur une crémaillère. Le galet se trouve rappelé vers le centre des plateaux par le mouvement de ceux-ci et entraîné au contraire vers la périphérie par le mouvement de la roue T que commande une transmission actionnée par l'essieu. La distance de ce galet au centre du disque donne ainsi à chaque instant une mesure de la vitesse, qui est indiquée extérieurement par le déplacement d'une aiguille devant un cadran ou d'un style enregistreur sur un cylindre de papier entraîné par un mouvement d'horlogerie. Grâce au mouvement continu, cet appareil n'a pas de retard et donne des mesures rapides et exactes, indépendantes du degré de lubrification des organes.

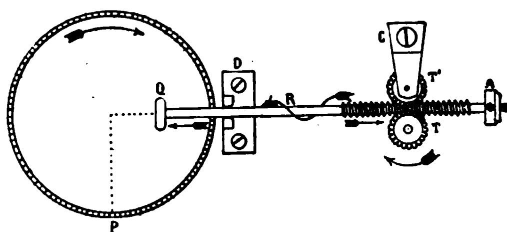
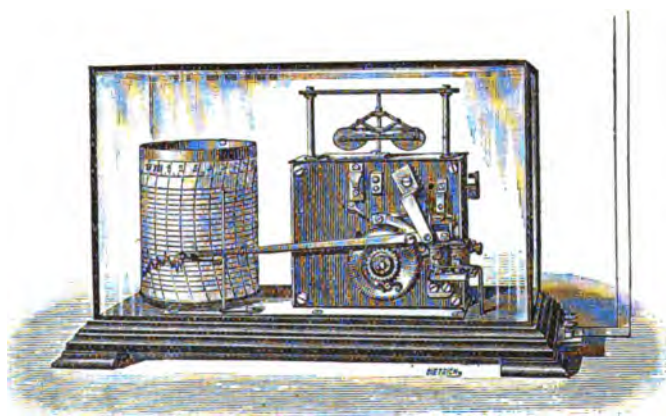


Fig. 770. — Principe du cinémomètre Richard.

Les indications du cinémomètre peuvent être transmises et enregistrées à distance à l'aide d'une transmission électrique analogue à celle de tous les appareils indicateurs ; l'appareil prend alors le nom d'électro-cinémographe (fig. 771).


Fig. 771. — Électro-cinémographe Richard.

En Amérique, on emploie à peu près exclusivement l'enregistreur de vitesse de *Boyer*, également fort bien compris : une petite pompe rotative est calée sur l'essieu et la pression qu'elle produit, proportionnelle au nombre de tours, est mesurée à l'aide d'un manomètre enregistreur à déplacement rectiligne, ce qui donne des courbes très lisibles.

La pompe à liquide pourrait être remplacée par un petit ventilateur avec un manomètre très sensible.

On construit aussi très facilement un enregistreur électrique de vitesse en calant sur l'essieu une petite dynamo à courant continu et à excitation constante, dont on inscrit le voltage à l'aide d'un voltmètre enregistreur de sensibilité convenable; la f. é. m. est en effet, comme on le sait, proportionnelle à la vitesse.

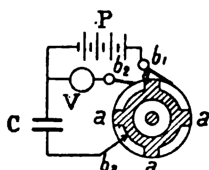


Fig. 772. — Schéma d'un indicateur de vitesse électrique.

A la place de cette dynamo, on peut employer plus simplement un disque d'ébonite (fig. 772) calé sur l'essieu et portant des segments a communiquant par un cercle et un balai b_3 avec l'un des pôles d'un condensateur C; pendant leur rotation, ces segments passent successivement sous un balai b_1 qui met le condensateur en relation avec une pile P qui le charge, puis sous un balai b_2 qui le décharge dans un voltmètre enregistreur V à très bas voltage (du type Chauvin et Arnoux, Weston ou Siemens). Sous l'action de ces décharges très rapprochées, l'instrument donne une déviation permanente proportionnelle à leur nombre et par suite à la vitesse. Le grand avantage de cette dernière méthode, c'est qu'elle peut s'appliquer très facilement à une voiture quelconque à l'aide de trois simples conducteurs de sonnerie qu'on place comme on veut, d'un disque d'ébonite ou de fibre coupé en deux parties qu'on vient serrer sur l'essieu, d'une petite batterie portative du genre des batteries médicales et d'un condensateur en papier paraffiné de quelques microfarads. On tare l'appareil en déterminant la déviation correspondant à une vitesse connue.

Mesures électriques. — Quand on mesure la dépense d'énergie, on se contente souvent de la totaliser par un compteur; mais il y a grand intérêt à en étudier les variations en cours de route et à la diviser en ses deux éléments, courant et tension; on devra donc placer sur la voiture d'essais un ampèremètre et un voltmètre enregistreurs, tout en conservant le compteur pour totaliser et contrôler les dépenses partielles; le wattmètre enregistreur, qu'on a employé quelquefois, ferait double emploi avec les deux premiers instruments. La figure 773 indique le montage des appareils sur le circuit d'une automobile à deux moteurs.

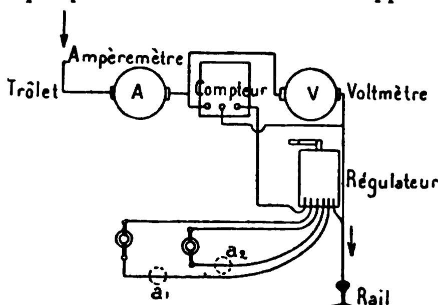


Fig. 773. — Montage des instruments de mesures électriques sur une automobile à deux moteurs.

Des ampèremètres et voltmètres apériodiques non enregistreurs

peuvent être utilisés accessoirement pour permettre des lectures faciles en cours de route [1], mais ils seraient insuffisants pour fournir à eux seuls les éléments d'une étude précise.



Fig. 774. — Ampèremètre enregistreur Chauvin et Arnoux.

On ne saurait recommander de relever à vue, comme on le fait partout en Amérique, où l'on semble ignorer à peu près complètement l'existence des enregistreurs, les ampères et les volts à des intervalles de quelques secondes (30 sur un long parcours, 2 aux démarrages) : c'est là une tâche énervante, dont les résultats ne méritent qu'une confiance très limitée parce que les variations qu'on néglige dans l'intervalle des lectures peuvent être plus considérables que celles qu'on note réellement.

Il existe aujourd'hui en France d'excellents ampèremètres et voltmètres enregistreurs qu'on peut employer pour ces essais et parmi lesquels il convient de citer ceux de *Chauvin et Arnoux* et de *Richard*.

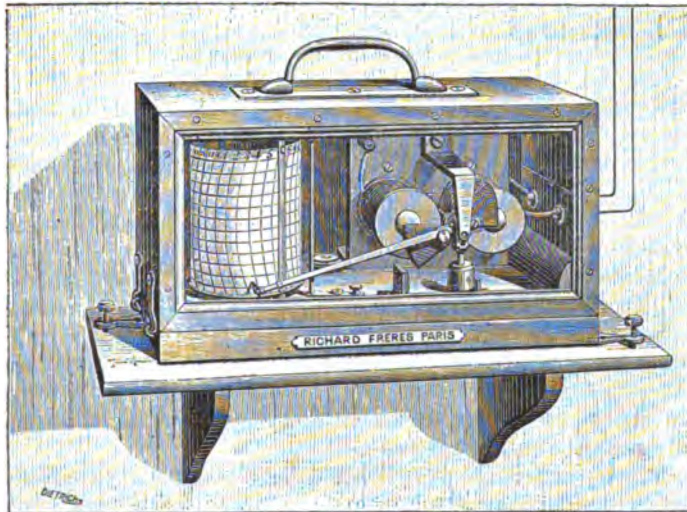


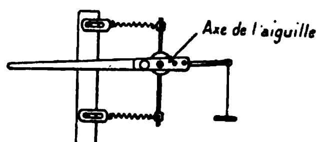
Fig. 775. — Ampèremètre enregistreur Richard.

Les premiers (fig. 774) sont de véritables galvanomètres à cadre mobile

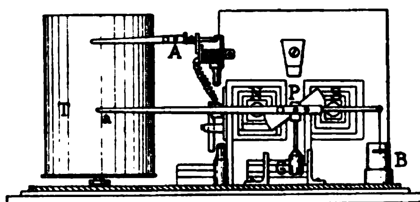
[1] Il s'agit ici d'essais à courant continu ; pour les courants alternatifs, il faut recourir de préférence aux appareils caloriques (Hartmann et Braun, Chauvin et Arnoux, Richard, etc.).

munis d'une longue aiguille terminée par une plume molette très ingénieuse, qui supprime presque entièrement les frottements sur le papier; la vitesse de défilement du cylindre se règle à volonté par un petit frein magnétique, ce qui est très commode pour cette application.

Les seconds (fig. 775) sont formés d'un électro-aimant parcouru par le courant à mesurer et devant les pôles duquel pivote une palette en fer doux portant la plume et un petit contre poids de réglage. Les appareils spéciaux pour tramways ou chemins de fer électriques sont munis d'un amortisseur à glycérine, constitué par un disque de laiton suspendu à une petite tige dans le prolongement du style inscripteur *a* (fig. 776) et plongeant dans un godet B rempli aux deux tiers de glycérine pure ou d'un mélange de glycérine et d'eau en proportions variables suivant l'amortissement qu'on veut obtenir ; en outre, dans ces enregistreurs spéciaux, le contre poids est remplacé par deux ressorts



Dispositif avec ressort antagoniste.



Dispositif avec contre poids.

Fig. 776. — Schéma d'un ampèremètre enregistreur Richard pouvant servir d'indicateur de charge et de décharge pour des voitures à accumulateurs.

S, N, pôles de l'électro-aimant. — P, palette mobile. — G, contre poids. — B, amortisseur à glycérine. *a*, style. — T, tambour. — A, chronographe.

à boudin équilibrés, comme l'indique le croquis de gauche de la figure 776. Quand un ampèremètre enregistreur est destiné à donner des diagrammes de charge et de décharge d'une batterie d'accumulateurs, on ajoute utilement à sa partie supérieure, comme le montre cette même figure, un chronographe A, constitué par une plume commandant un électro-aimant dans lequel un courant auxiliaire est lancé automatiquement par un relais formé d'une armature polarisée attirée ou repoussée suivant le sens du courant dans l'ampèremètre ; ce dispositif a été employé, par exemple, sur des voitures à accumulateurs de la ligne Paris-Saint-Denis ; le chronographe marche sous 3 ou 4 volts, c'est-à-dire avec une batterie de trois Leclanché ou deux accumulateurs ; on peut aussi l'intercaler dans un circuit de lampes. Pour les longs parcours, la feuille ordinaire des cylindres enregistreurs est remplacée par une bande de papier qui peut enregistrer un trajet complet.

Les conditions essentielles pour le bon fonctionnement des appareils choisis en vue d'essais de ce genre sont d'abord celles que l'un de nous a indiquées d'une façon générale pour tous les instruments enregistreurs [1], à savoir :

1° Une période d'oscillation propre très courte ; elle ne devra pas dépasser une à deux secondes pour une oscillation complète lorsqu'il s'agira d'étudier des phénomènes rapides tels que la mise en marche d'une voiture ;

[1] A. Blondel, Théorie générale des instruments indicateurs et enregistreurs, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1893.

2° Un amortissement convenable : il ne faut pas que l'aiguille puisse osciller pour son propre compte ; par conséquent, l'instrument doit être sensiblement apériodique, c'est-à-dire revenir au zéro sans oscillation lorsqu'on coupe le courant ; mais comme l'apériodicité exagérée nuit à la précision de l'inscription et ne permet pas de vérifier s'il y a du frottement sur le papier, il faut choisir un amortissement un peu trop faible qui laisse l'aiguille lancée brusquement faire un très léger crochet avant de s'arrêter à sa position finale ;

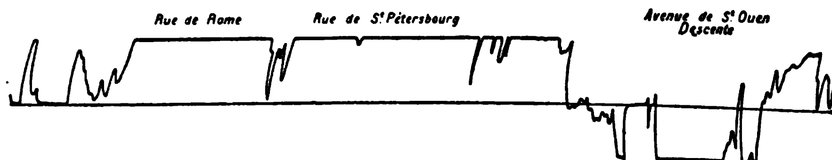


Fig. 777. — Courbe du wattmètre enregistreur.

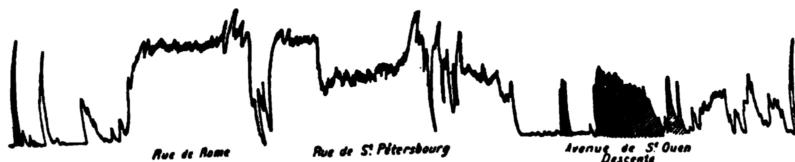


Fig. 778. — Courbe de l'ampèremètre enregistreur.

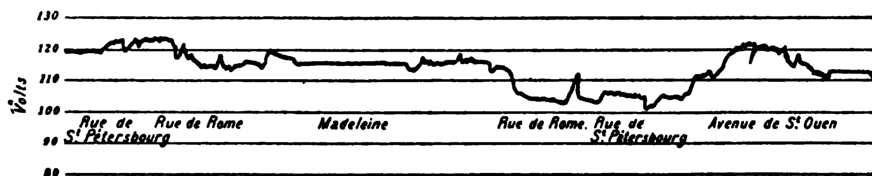


Fig. 779. — Courbe du voltmètre enregistreur.

Fig. 777, 778, 779. — Courbes enregistrées sur une voiture à accumulateurs des tramways de Paris et du département de la Seine.

si ce crochet disparaît, on est ainsi averti que le frottement de la plume sur le papier est trop fort et on doit le réduire. Dans ces conditions, le temps que l'aiguille met à atteindre sa position à 1/100 près, lorsqu'on applique brusquement le courant, est à peu près égal à la durée d'une oscillation propre de l'aiguille sans amortissement ; c'est ce qui justifie la première condition.

Il faut soustraire les instruments, même amortis, aux trépidations de la voiture, soit en les plaçant sur des cales[1] ou sur un filet de caoutchouc fixés aux parois d'une caisse, soit en les suspendant par des tresses de même substance au plafond de la voiture[1].

Les figures 777, 778 et 779 donnent, à titre d'exemple, des spécimens de

[1] Pour obtenir de bons résultats, on prendra des cales très épaisses et souples, et on augmentera l'inertie de la partie supportée en plaçant sous les instruments une plaque de fonte.

courbes ainsi enregistrées sur une voiture d'expériences à accumulateurs des tramways de Paris et du département de la Seine au moyen d'un ampèremètre, d'un voltmètre et d'un wattmètre Richard ; on remarquera que, pendant certains parcours où la puissance mécanique dépensée est sensiblement constante, le wattmètre donne une déviation presque invariable, tandis que l'ampèremètre et le voltmètre subissent d'importants à-coups.

Quant au compteur, le meilleur type est le compteur *Elihu Thomson*, trop connu pour que nous le décrivions ici et dont il existe un modèle spécial pour les essais de ce genre, que représente la figure 780. Cet appareil est suspendu



Fig. 780. — Compteur portatif E. Thomson.

sur un filet de caoutchouc dans une boîte portative ; l'emploi en est des plus faciles. La figure 781 représente schématiquement le montage et les connexions de l'instrument, qu'on intercale sur le trajet du câble principal venant de la prise de courant ; pour s'en servir, on suivra les instructions du constructeur.

En outre de ce modèle portatif, la General Electric Co., en présence de demandes croissantes, a créé plus récemment un type spécial de compteur fixe destiné à être placé à demeure dans les voitures. Le moteur de cet appareil a un inducteur à noyau de tôles qui produit un champ assez énergique pour permettre l'emploi de balais bien serrés sans gêner les indications de l'instrument, dont la vitesse est à chaque instant proportionnelle à la puissance consommée ; grâce à ce fait et à la résistance très faible de l'armature, il n'y a pas à craindre d'étincelles destructives aux balais sous l'influence des trépidations, et, d'autre part, la puissance dépensée dans le compteur est très minime. Les parties mobiles sont très légères, pour réduire l'inertie, et le saphir

servant de pivot est monté sur ressort. L'appareil démarre avec facilité et sa vitesse peut suivre les fluctuations du courant ; il est très robuste et peut supporter une surcharge de 25 p. 100 d'une façon permanente et de 100 p. 100 aux démarrages. On le construit pour 25 amp. × 500 volts et pour 50 amp. × 500 volts.

On peut quelquefois trouver intérêt à ajouter des ampèremètres a_1 et a_2 (fig. 773) sur le circuit spécial de chaque moteur, s'il y en a plusieurs, pour vérifier la répartition du courant, qui peut être assez inégale.

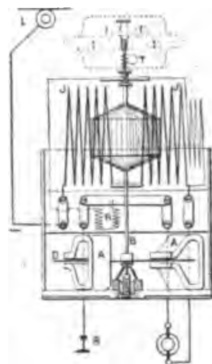


Fig. 781. — Montage du compteur E. Thomson pour les essais de traction.

Mesures mécaniques. — Les mesures mécaniques ont pour objet de déterminer l'effort de traction ou la résistance à la traction soit d'un véhicule (automobile ou voiture remorquée), soit d'un train.

La résistance à la traction peut se mesurer par deux méthodes différentes, suivant que l'on recourt ou non à l'emploi d'un dynamomètre de traction.

Méthodes chronométriques. — La méthode la plus simple, qu'on peut appeler *méthode de la gravité*, consiste à faire descendre au véhicule ou au train à expérimenter une longue pente bien uniforme et droite, en vertu de son propre poids, après l'avoir au besoin lancé à la vitesse normale à l'aide d'une voiture motrice ; il faut avoir soin d'enlever le pignon d'engrenage, si l'on veut obtenir la résistance vraie du véhicule seul. Dans ces conditions, la vitesse prend rapidement une valeur constante et telle que le travail des résistances passives, qui croissent avec elle, fasse exactement équilibre au travail de la pesanteur.

Soient h la hauteur dont descend la voiture ou le train dans un temps t sur cette pente uniforme d'inclinaison i, P son poids total, F l'effort résistant total, V la vitesse uniforme atteinte, l l'espace parcouru ; l'égalité des travaux donne l'équation

$$FVt = Ph,$$

d'où

$$\frac{F}{P} = \frac{h}{l} = i.$$

Le coefficient de traction $\frac{F}{P}$ à différentes vitesses est donc mesuré précisément par l'inclinaison des diverses pentes sur lesquelles ces vitesses sont obte-

nues en régime permanent par l'effet de la seule gravité. Si on laisse les engrenages en prise au lieu d'enlever le pignon, on trouve une valeur plus grande du coefficient

$$\frac{F'}{P} = i'.$$

La différence $(i' - i)$ représente le frottement du mécanisme.

On peut dresser par ce moyen la loi complète de variation du coefficient de traction en fonction de la vitesse ; mais cette méthode exige qu'on dispose de pentes en alignement droit assez variées et assez longues.

On peut s'en passer, il est vrai, en opérant par la *méthode du ralentissement*, qui consiste à lancer une voiture sur une partie de voie en alignement droit

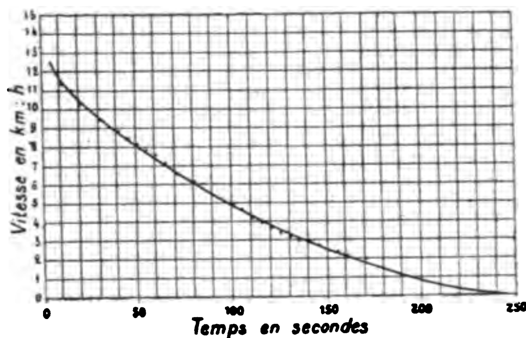


Fig. 782. — Courbe de ralentissement d'une automobile de tramway sur voie Vignole.

dont la déclivité reste constante sur une certaine longueur, et à mesurer son ralentissement au bout d'un temps connu t. Cette mesure se fait facilement en laissant tomber des boulettes de plâtre, à intervalles de cinq secondes par exemple, comme nous l'avons expliqué plus haut, au commencement, puis à la fin du ralentissement.

L'équation du mouvement, en supposant la force retardatrice F constante, donne pour valeur de l'accélération négative correspondante :

$$\frac{P}{g}\left(\frac{v_1 - v_0}{t}\right) = F \pm Pi \quad (+\,i \text{ sur une rampe, } -\,i \text{ sur une pente}),$$

d'où

$$\frac{F}{P} = \left(\frac{v_1 - v_0}{gt}\right) \mp i.$$

Le coefficient de traction $\frac{F}{P}$ ainsi obtenu doit être rapporté à la vitesse moyenne $\frac{v_1 + v_0}{2}$; aussi cette méthode convient-elle mal sur les chemins de fer, où la vitesse est grande et le coefficient de traction très variable avec celle-ci ; elle s'applique, au contraire, assez bien aux voitures de tramways, dont

la vitesse reste toujours faible et a peu d'influence sur la résistance, ainsi que le montre, par exemple, une courbe de ce genre (fig. 782) relevée par MM. Curtiss et Pond [1] et qui se rapproche d'une ligne droite. On peut l'employer aussi pour la détermination du coefficient de roulement proprement dit sur les chemins de fer, cas auquel il faut prendre une vitesse aussi faible que possible.

On remarquera qu'on peut éliminer la mesure de l'inclinaison i de la formule précédente en recommençant la même expérience en sens inverse ; d'où, en additionnant les deux lectures,

$$\frac{F}{P} = \frac{1}{2g}\left[\frac{v_1 - v_0}{t} + \frac{v'_1 - v'_0}{t'}\right] = \frac{1}{19,6}\left[\frac{v_1 - v_0}{t} + \frac{v'_1 - v'_0}{t'}\right].$$

Lorsqu'on applique ce procédé aux automobiles électriques, il faut, comme dans la méthode précédente, enlever le pignon d'engrenage pour avoir le coefficient de traction vrai du véhicule ; en replaçant le pignon, on aura une mesure du coefficient supplémentaire correspondant au mécanisme.

Méthodes dynamométriques. — On peut opérer d'une manière plus rigoureuse en employant un dynamomètre de traction intercalé entre le véhicule moteur et le véhicule ou le train remorqué et servant à mesurer à chaque instant l'effort de traction appliqué à celui-ci.

Un dynamomètre de traction est constitué en général par un attelage élastique, retenu par deux jeux de ressorts attachés par des menottes ; la flexion des ressorts, étant sensiblement proportionnelle à la tension exercée, donne une mesure de celle-ci.

La plupart des grandes compagnies de chemins de fer ont établi des fourgons dynamométriques dans lesquels les allongements ou flexions des ressorts du dynamomètre sont reportés sur un cylindre de papier par une série de leviers convenablement disposés et formant un mécanisme solidaire du wagon. La figure 427 (t. I, p. 483) représente, par exemple, un spécimen des graphiques ainsi relevés sur le fourgon d'expériences de la Compagnie de l'Ouest pendant les essais de la première locomotive Heilmann. Ces engins peuvent naturellement servir à l'étude du matériel électrique aussi bien qu'à celle du matériel ordinaire, mais sans que cette application présente rien de particulier ; nous n'en donnerons donc pas ici les détails et nous renvoyons les lecteurs que ce sujet peut intéresser aux descriptions originales [2].

[1] *Thèse* présentée à la Cornell University, 1896.

[2] Wagon d'expériences de la Compagnie de l'Est, *Revue générale des chemins de fer*, novembre 1878.

Wagon dynamomètre de la Compagnie du Nord, *idem*, avril 1883.

Fourgon d'expériences de la Compagnie de l'Ouest, *idem*, juillet 1889.

Wagon dynamomètre de la Compagnie P.-L.-M, *idem*, février 1894.

On trouvera un intéressant résumé de ces descriptions dans l'ouvrage déjà cité de MM. Deharme et Pulin, *Matériel roulant et traction*, p. 71-110.

Nous montrons d'ailleurs au paragraphe suivant que les chemins de fer équipés électriquement peuvent se passer de ces appareils spéciaux pour la mesure des efforts de traction.

Sur les tramways, il est plus simple d'employer des dynamomètres à pression hydraulique, qui s'adaptent sans disposition spéciale à une voiture quelconque et ne présentent pas l'encombrement ni l'inertie des dispositifs précédents.



Fig. 783. — Dynamomètre Richard.

Tel est, par exemple, le dynamomètre *Richard*, que représente la figure 783 et qui a été employé notamment par M. de Mas dans ses beaux travaux sur la traction des bateaux. Il consiste en un étrier portant une cuvette fermée par une membrane de caoutchouc et remplie d'eau ; sur cette membrane s'applique un piston de surface connue fixé sur un second étrier et guidé par une couronne. L'effort de traction est mesuré par la pression du liquide sur un manomètre enregistreur (fig. 784) relié à la cuvette par un tube souple et convenablement gradué ; la sensibilité de l'instrument peut être modifiée à volonté en changeant ce manomètre.

M. *Desdouits* a proposé et employé un autre type de dynamomètre, fondé sur un principe tout différent, qui mesure à l'aide d'une sorte de pendule et inscrit automatiquement les accélérations $\frac{dv}{dt}$ des trains où on le place [1].

Les vitesses s'en déduisent par intégration,

$$v_1 - v_0 = \int_{t_0}^{t_1} \frac{dv}{dt} dt,$$

et les efforts de traction à la jante des roues par simple proportionnalité, en vertu de la relation fondamentale

$$F = \frac{P}{g} \frac{dv}{dt}.$$

Cette méthode donne l'effort total et n'exige pas de wagon spécial ; mais elle est d'un emploi plus délicat que la précédente et ne s'applique pas en régime de vitesse constant ; de plus, les courbes relevées sont souvent irrégulières et demandent une interprétation assez difficile. L'usage nous paraît donc devoir en être limité au cas des régimes très variables correspondant soit au démarrage, soit au freinage, auquel cas l'étude de l'accélération peut donner lieu,

[1] Cf. Desdouits, Note sur un nouvel appareil dynamométrique, *Revue générale des chemins de fer*, octobre 1883, p. 215.

comme l'a montré M. Desdouits, à des constatations fort intéressantes, aussi bien sur les tramways que sur les chemins de fer [1].

Emploi de l'ampèremètre comme dynamomètre. — La traction électrique permet d'effectuer les mesures d'effort très facilement, sans recourir à aucun des appareils précédents. Les moteurs d'une automobile ou d'une locomotive constituent en effet le plus précis des dynamomètres, dès qu'on a relevé par un tarage préalable les courbes d'effort en fonction du courant pour les positions normales du régulateur ; ce tarage, qui n'est pas sensiblement plus compliqué

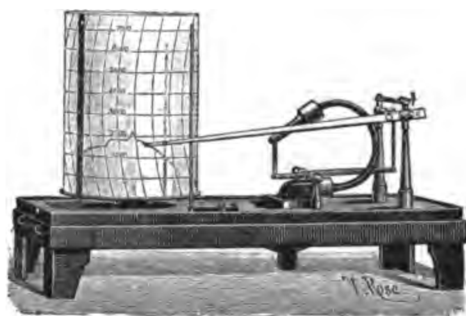


Fig. 784. — Manomètre du dynamomètre Richard.

que celui d'un dynamomètre de traction, se fera en soulevant la voiture de façon à rendre les roues libres et appliquant un frein de Prony sur les roues ; le frein peut être bloqué, pour les motifs indiqués plus haut.

La mesure du nombre d'ampères consommés par un équipement donne, en se reportant à ces courbes, l'effort exercé à la jante des roues motrices. On peut ainsi mesurer non seulement, comme avec un dynamomètre ordinaire, la résistance à la traction d'un train ou d'un véhicule remorqué par une voiture motrice, mais encore la résistance totale de l'ensemble, comme avec le pendule Desdouits.

La graduation des moteurs en fonction du courant est d'autant plus facile à réaliser que, dans les limites pratiques, en dehors de la descente des rampes, la courbe d'effort se réduit, comme on l'a vu précédemment (p. 86), à une droite correspondant à une simple formule linéaire

$$F = A + BI.$$

[1] Cf. Desdouits, *loc. cit.*; Widmer, Étude sur le funiculaire de Belleville, *Ann. des Ponts et Chaussées*, 1er semestre 1893.

Supposons que cette valeur F ait été obtenue pour un train et sa locomotive, et qu'en faisant circuler ensuite la locomotive seule sur la même rampe et à la même vitesse (obtenue au moyen de rhéostats en série) on relève un nouveau courant I', correspondant à un effort à la jante

$$F' = A + BI' ;$$

on en déduit immédiatement pour valeur de l'effort au crochet nécessaire à la remorque du train seul

$$F - F' = B (I - I').$$

L'effort au crochet est donc simplement proportionnel au courant, ce que l'expérience vérifie ; on a constaté, par exemple, que les locomotives électriques du Baltimore and Ohio R. R. développent un effort au crochet de 13 kg. par ampère[1].

La locomotive électrique est ainsi à elle seule le meilleur des dynamomètres. On peut la tarer facilement en lui faisant tirer au repos un câble qui soulève des poids connus ; deux mesures suffisent à donner B, d'après la formule précédente[2]. Avec un simple ampèremètre enregistreur, on réalise l'enregistrement des efforts ; en faisant dérouler le papier proportionnellement aux distances parcourues, l'aire de la courbe donne le travail total produit $\mathcal{C}$, qu'on peut aussi mesurer directement à l'aide d'un compteur d'énergie en faisant passer le courant de la voiture I dans la bobine en gros fil et le courant i du voltmètre indicateur de vitesse dans la bobine en fil fin, débarrassée de la résistance qui l'accompagne : le compteur donnera, en effet, en watts-heures l'intégrale

$$WH = \lambda \int Iidt = k \int FVdt = k\ \mathcal{C},$$

en appelant λ et k des constantes à déterminer par le calcul ou par tarage d'après un dynamomètre à ressorts.

Ce procédé constitue, croyons-nous, la véritable méthode dynamométrique applicable sur les lignes à traction électrique.

[1] Il va sans dire que I est la somme des courants qui passent dans les différents moteurs, quel que soit leur mode de groupement.

[2] On n'obtient ainsi que l'effort statique, lequel diffère légèrement de l'effort dynamique par l'effet des courants de Foucault, etc., comme on l'a vu plus haut (p. 72) ; mais on peut négliger cette différence, qui est insignifiante.

Mesures de rendement. — Les mesures de rendement des moteurs indiquées au § 3 donnent en général des chiffres supérieurs à ceux qui sont réalisés en service courant, soit à cause des frottements supplémentaires des paliers d'essieux et de l'usure des engrenages, soit à cause des patinages partiels des roues. Aussi, pour avoir une idée exacte des pertes d'énergie, est-il intéressant de déterminer le rendement des voitures en marche en prenant le rapport du travail produit à la jante à l'énergie électrique dépensée aux bornes. Pour cela, il suffit de planimétrer la courbe des efforts ou de l'intégrer, comme nous venons de l'expliquer, à l'aide d'un compteur convenablement modifié.

A défaut de ce procédé, on peut arriver sensiblement au même résultat en calculant, d'après des données préalablement relevées (poids de la voiture, déclivité, accélération, coefficient de traction en palier du véhicule seul), les éléments du travail mécanique effectué pour la traction, suivant les formules connues que nous rappelons au chapitre XIII. En additionnant ces éléments, on a une valeur assez approchée du travail total, qu'on peut comparer à l'énergie électrique mesurée au compteur.

Le tableau ci-dessous donne un exemple d'application de cette méthode, d'après des essais de MM. Hering et Aldrich sur le matériel Sprague à double réduction de la ligne de Neversink Mountain [1].

POSITION du régulateur Spraguc.	TENSION en volts.			COURANT en ampères.			PUISSANCE électrique moyenne (intégrée) fournie aux moteurs en chevaux H.P.	Temps en secondes.	Vitesse moyenne en kilomètres à l'heure.	Élévation moyenne en mètres par seconde.	PUISSANCE À LA JANTE (calculée) en chevaux.			Rendement calculé.
	Maxima.	Minima.	Moyenne.	Maximum.	Minimum.	Moyen.					Élévation.	Traction.	Total.	
2	488	445	473	62,6	54,8	57,8	36,8	75	12,0	0,118	16,6	5,0	21,6	58,8
4	493	440	476	58,6	51,8	56,0	35,3	66	13,8	0,134	18,9	5,6	24,5	69,5
6	531	472	502	71,5	58,6	65,4	44,0	48	18,8	0,188	26,0	7,8	33,8	77,0
7	515	466	488	78,5	61,7	67,5	45,0	46	19,2	0,191	27,1	8,2	35,3	78,5

Essai fait en alignement droit, sur rampe de 3,5 p. 100, avec une voiture chargée pesant 10 860 kg., le coefficient de traction étant pris égal à 10 kg. par tonne.

[1] *The Electrical World*, 16 juillet 1892.

Les rendements calculés paraissent plutôt au-dessus de la réalité, étant donné l'emploi de la double réduction. Cela tient sans doute à ce que cette méthode présente maintes causes d'erreur dans l'évaluation du coefficient de traction et de l'accélération. Elle peut néanmoins donner de bons résultats si on l'applique sur des rampes uniformes et assez fortes et à des vitesses assez constantes pour rendre les erreurs peu importantes en valeur relative. Il est à recommander aussi, pour éviter les erreurs provenant du patinage des roues, de mesurer le parcours sur le profil et non d'après le nombre de tours de roue.

Installation d'un véhicule d'expériences pour la traction électrique. — On voit, d'après ce qui précède, qu'un véhicule d'expériences établi rationnellement devra comprendre les instruments nécessaires pour enregistrer à la fois le courant consommé, qui indiquera l'effort, le voltage, la vitesse [1] et enfin les points de repère de la ligne.

Pour l'inscription, on peut prendre comme variable commune (abscisse du graphique) le temps ou la distance parcourue.

Dans le premier cas, on adoptera sous forme séparée les appareils décrits ci-dessus (ampèremètre, voltmètre, tachomètre, chronographe) et on règlera simplement leurs mécanismes de façon qu'ils fonctionnent tous synchroniquement et que les cylindres fassent leur tour dans le même temps ; le chronographe destiné à inscrire le passage aux points de repère peut, à la rigueur, être confondu avec l'un des autres instruments, en ajoutant à celui-ci un petit électro-aimant inscripteur. Une fois les courbes relevées, on collera les bandes de papier des divers appareils les unes audessous des autres. Il serait plus commode d'ailleurs de faire réunir par le constructeur les quatre appareils sur un même support, avec un grand cylindre enregistreur commun actionné par un seul mouvement d'horlogerie.

Dans le second cas, on adoptera toujours cette dernière disposition, tout en modifiant le mouvement d'horlogerie de façon qu'il fasse tourner le cylindre proportionnellement non au temps, mais aux distances parcourues : ce résultat s'obtiendra, par exemple, en donnant au mécanisme un échappement à ancre commandé par un électro-aimant dans lequel une émission de courant sera

[1] On peut obtenir la vitesse en comparant les parcours aux temps, comme nous l'avons dit plus haut; mais il est préférable pour la rapidité de la lecture des graphiques de l'inscrire sous forme d'ordonnées.

produite tous les 10, 20 ou 50 tours de roue par un contact établi dans un compteur de tours ou appareil similaire fixé à l'essieu. La figure 785 représente schématiquement l'appareil d'ensemble, supposé constitué par trois enregistreurs Chauvin et Arnoux et deux chronographes Richard commandés l'un par une horloge, l'autre par un bouton de contact à la main. Un appareil de ce genre peut être adapté facilement sur n'importe quelle voiture, puisqu'il n'exige pour la transmission mécanique du mouvement des essieux que quatre fils conducteurs, deux pour la mesure des vitesses au moyen d'un voltmètre et deux pour l'entraînement du papier ; encore peut-on, ainsi qu'on l'a vu, supprimer l'indicateur de vitesse. On y joindra un compteur d'énergie et éventuellement un compteur de travail, réalisé comme nous l'avons indiqué plus haut.

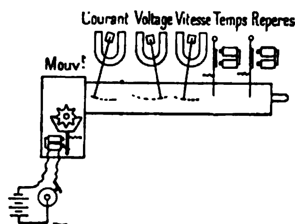


Fig. 785. — Schéma d'un appareil enregistreur pour voiture d'expériences à traction électrique.

II. — Dépouillement et analyse des résultats

Il ne suffit pas de relever des graphiques, il faut en tirer profit, et dans ce but dépouiller les résultats qu'ils contiennent et ceux qu'on a pu relever d'autre part sur le carnet d'expériences ; les résultats principaux, dont quelques-uns ne s'obtiennent qu'après calculs, sont alors reportés sur des tableaux d'ensemble ou des graphiques qui permettent de les consulter facilement et de les comparer en vue du but poursuivi dans les essais.

Ces tableaux et graphiques peuvent être rédigés de façons fort différentes. Nous en donnerons quelques exemples.

Détermination du coefficient de traction moyen. — Si l'on se propose de déterminer le coefficient de traction (voir chap. XIII) d'un matériel roulant déterminé, sur une voie donnée, d'après des essais dynamométriques, on devra, dans un relevé de parcours aller et retour, éliminer toutes les parties du trajet sur lesquelles on a dû faire usage des freins ou pratiquer la récupération ; puis, on intégrera le travail total sur les parties restantes et on le divi-

sera par la longueur correspondante du parcours. On aura ainsi l'effort moyen et par suite le coefficient de traction moyen.

On pourra, d'autre part, examiner séparément les efforts nécessaires sur les rampes ou sur les pentes et les comparer avec les efforts théoriques donnés par le calcul (voir chap. XIII).

Enfin, si l'on a fait des essais comprenant à la fois des relevés dynamométriques et des mesures wattmétriques (compteur), on pourra déterminer le rendement de l'équipement.

Toutes les fois qu'on examine l'effort dépensé ou le courant consommé sur un élément de parcours, il faut avoir soin, pour en déduire un coefficient de traction, de tenir compte des efforts supplémentaires dus à la gravité et à l'inertie lorsque la voiture subit une accélération soit positive, soit négative.

Il va sans dire que, s'il y a du vent, on devra faire une correction qui tienne compte de l'effet de celui-ci. En tout cas, il faudra faire état de la résistance atmosphérique. Soient V la vitesse de la voiture, V′ celle du vent, S la surface de front; l'effet total équivaut, comme on le verra au chapitre XIII, à une résistance supplémentaire $\lambda S (V - V')^2$ ou $-\lambda S (V + V')^2$, suivant que le vent est dirigé dans le sens du mouvement ou en sens opposé. Cette correction est inutile si l'on fait deux parcours en sens inverse et à très faible vitesse.

De même, si la vitesse de la voiture ne reste pas constante, on devra tenir compte de l'inertie du véhicule et de celle du moteur en mouvement, comme nous l'indiquons au chapitre XIII. L'essai par ralentissement n'est du reste qu'un cas particulier du freinage étudié au chapitre XIV.

La mesure de la résistance au roulement du matériel roulant des chemins de fer se fait de la même manière, au moyen de parcours successifs en sens opposés sur des voies de gare ou de dépôt, ou mieux en pleine voie; pour rendre sûrement négligeable l'influence de la résistance de l'air sur la surface de front, il est bon de prendre non un véhicule isolé, mais un train formé d'un grand nombre de véhicules ; on obtient aussi par ce procédé une allure plus stable.

Essais de consommation et de fonctionnement général. — Les

essais les plus fréquents sont des essais de fonctionnement général, dans lesquels, tout en mesurant la consommation d'énergie et inscrivant les circonstances qui peuvent la modifier, on note les échauffements et autres conditions de marche des appareils. Ces essais sont surtout instructifs lorsqu'on pratique l'enregistrement automatique décrit plus haut ; mais on peut se contenter le plus souvent de noter les valeurs moyennes et maxima du courant et de la vitesse. Lorsqu'on opère ainsi, il est bon qu'il y ait deux observateurs au moins, dont l'un chargé plus spécialement d'inscrire les observations.

Celles-ci peuvent être, par exemple, les suivantes :

A. — *Avant le départ.*

1° Type de voiture (vérifier si les freins se desserrent bien) ;
2° Poids du véhicule moteur et des voitures remorquées, s'il y a lieu ;
3° Nature de l'équipement : nombre, poids, puissance et type des moteurs ; système de transmission, rapport de réduction des engrenages ;
4° Nature de la voie : type de rails, état d'usure et d'entretien ;
5° Condition de la voie (sèche ou humide, propre, poussiéreuse ou boueuse) ;
6° Température ;

B. — *Pendant la marche.*

1° Point et heure de départ ;
2° Chiffre lu au compteur au départ ;
3° Nombre de voyageurs ;
4° Courant maximum au démarrage et durée de la mise en vitesse ;
5° Vitesses maxima et minima et points où elles ont été réalisées ; régimes de courant et de voltage correspondants ;
6° Durée du ralentissement (entre le moment de l'interruption du courant et celui du serrage des freins) ;
7° Point et heure d'arrêt ;
8° Durée de l'arrêt ;

On recommencera la même série d'observations après chaque arrêt pour l'élément de parcours suivant ;

C. — *A l'arrivée.*

1° Heure d'arrivée et durée totale du parcours ;
2° Distance parcourue ;
3° Chiffre lu au compteur et dépense totale d'énergie correspondante ;
4° Température des boîtes à graisse, des coussinets d'armature et d'essieu, de l'induit et des bobines d'inducteurs ;
5° Observations sur le degré d'habileté du mécanicien et sur les incidents du trajet ;

On inscrit ces divers renseignements pour chaque parcours sur des feuilles préparées d'avance, sous une forme analogue à celle ci-après (p. 402).

N° DE L'ESSAI :

Voiture { Truck. . . . . . . / Caisse. . . . . . . / Nombre de places .
Equipement { Moteurs. . . . / Engrenages[1]. .
Poids de l'automobile[2]. . . .
Poids des voitures remorquées.
Etat des engrenages[3]. . . . .
Voie[4]. . . . .
Condition de la voie[5]. . . . .
Etat de l'atmosphère[6] . . . .
Température[7] des fusées d'essieu
— des coussinets du moteur . . . .
Température de l'armature . .
— des inducteurs. .
Habileté du mécanicien . . .

Longueur totale du parcours.
Durée — — — .
Vitesse commerciale . . . . .
Dépense totale d'énergie lue au compteur. . . . .
Nombre moyen de voyageurs transportés . . . .
Poids moyen total pendant le parcours[8]. . . . .
Nombre total d'arrêts . . . .
Durée totale des arrêts . . . .
Durée moyenne des arrêts . .
Vitesse entre arrêts. . . . . .
Puissance moyenne dépensée entre arrêts en watts. . . .
Dépense moyenne d'énergie par tonne-kilomètre . . . . . .

Point de départ.	Heure de départ.	Nombre de voyageurs.	Lecture au compteur.	DÉMARRAGE		VITESSE		COURANT correspondant		VOLTAGE correspondant		Durée du ralentissement	Point d'arrêt.	Heure d'arrêt.	Distance parcourue.	Lecture au compteur.	Durée de l'arrêt.	OBSERVATIONS
				Durée.	Courant maximum.	Maxima V_1	Minima V_2	à V_1	à V_2	à V_1	à V_2							
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

[1] Coefficient de réduction, profil des dents (épicycloïde ou développante), métal des dents, nature du graissage.

[2] Si la voiture est trop longue pour tenir sur une bascule, la faire porter par un essieu seulement sur celle-ci et doubler le poids trouvé ; si la voiture est à trois essieux, soulever l'extrémité qui n'est pas sur la bascule de façon que les roues du milieu ne touchent plus le sol.

[3] Jeu des arbres (un jeu exagéré augmente le frottement des dents), poli des surfaces, usure plus ou moins régulière, abondance du graissage.

[4] Poids et type des rails.

[5] Etat des joints, usure des rails; degré de propreté et d'humidité.

[6] Sécheresse, humidité, poussière, brouillard, pluie, neige, verglas; force et direction du vent relativement à la voie.

[7] Ces températures se prennent en plaçant le réservoir d'un thermomètre contre l'objet à thermométrer et le recouvrant extérieurement d'une large touffe d'ouate; on lit la température lorsqu'elle ne monte plus, en général au bout de cinq minutes; elle ne doit pas dépasssr 100° C.

[8] Ce poids se déduit du poids à vide et du nombre de voyageurs en comptant en moyenne 70 kg. par personne.

N° de l'essai.			
DÉFINITION du matériel roulant.	Type de voiture.		
	Type de moteurs.		
	Transmissions.		
	Poids total du véhicule.		
CONDITIONS extérieures.	État de l'atmosphère.		
	Température.		
	Type de rails.		
	Condition de la voie.		
CONDITIONS DU PARCOURS	Longueur du parcours.		
	Durée du parcours.		
	Nombre moyen de voyageurs.		
	NOMBRE d'arrêts.	complets.	
		partiels.	
		total.	
	Durée totale des arrêts.		
	Durée moyenne d'un arrêt.		
	Courant maximum de démarrage.		
	Durée d'accélération.		
	Vitesse maxima.		
	Courant correspondant.		
	Vitesse moyenne.		
DÉPENSES d'énergie.	Dépense d'énergie totale.		
	Puissance moyenne dépensée entre arrêts.		
	Dépense moyenne d'énergie par tonne-kilomètre.		
ÉCHAUFFEMENT DU MATÉRIEL pendant le parcours.	Armature.		
	Inducteurs.		
	Coussinets du moteur.		
	Fusées d'essieu.		
Habileté du mécanicien.			
OBSERVATIONS			

On remarquera que les observations du tableau sont, les unes relevées directement, les autres inscrites plus tard après calculs.

Tout chiffre dont la valeur peut être rendue douteuse par un fait signalé dans la colonne des observations sera mis entre parenthèses.

Une fois ces tableaux élémentaires complétés, on les résume dans un tableau récapitulatif, où ne figurent plus que les résultats directement intéressants; on peut dresser, par exemple, ce dernier dans la forme de celui de la page 403.

Lorsqu'on désire comparer les dépenses d'énergie à toutes les variations des résistances mécaniques le long d'un parcours, on peut enfin tracer des graphiques complets de ce parcours, où l'on fait figurer toutes les données de la voie et l'évaluation des résistances par le calcul. La figure 786 donne un exemple de tracés de ce genre établis par le Prof. Hermann S. Hering [1], et le tableau de la page 406 les résume.

Quand on compare des résultats relevés de cette manière, on est à même de tenir compte des circonstances différentes dans lesquelles les divers essais ont été exécutés : les indications relatives à la voie, au type de moteurs et d'engrenages, aux rampes et courbes, à la vitesse, à la charge, au nombre d'arrêts, à la durée de ceux-ci et à celle de la mise en vitesse ont précisément pour but de faire ressortir les éléments qui influent le plus sur la consommation kilométrique.

Un parcours rapide avec de nombreux arrêts un peu longs entraîne une dépense d'énergie infiniment plus grande qu'un parcours à vitesse modérée et à arrêts rares ou partiels; on en verra des exemples au chapitre suivant; le démarrage rapide consomme plus que le démarrage lent. Il faut tenir compte aussi du type de moteurs, car ils ne donnent pas tous le même rendement ni la même variation de rendement en fonction de la charge.

Un peu d'expérience apprendra vite aux observateurs à faire la part de ces divers éléments pour interpréter dans les chiffres relevés des anomalies qui, à première vue, pourraient paraître inexplicables.

Suivant l'habileté du mécanicien, des différences de 10 à 20 p. 100 peuvent se produire dans la dépense totale d'énergie ; il est donc nécessaire de tenir compte de ce facteur personnel ; mais il vaut encore mieux l'éliminer dans des essais comparatifs en employant toujours le même mécanicien sur le même parcours.

Si l'on prend cette précaution, la valeur du courant maximum est intéressante au point de vue du fonctionnement de la station génératrice, car elle donne une mesure comparative des fluctuations de la puissance demandée aux dynamos suivant le matériel roulant employé ; plus ces fluctuations sont importantes, plus le rendement moyen s'abaisse et plus il faut, d'autre part, augmenter la puissance maxima des génératrices et machines motrices relativement à la puissance moyenne, ainsi que la section des lignes d'alimentation.

Essais simples de consommation. — Lorsqu'on se préoccupe seulement d'étudier la consommation de courant, il suffit de dres-

[1] *Electric Railway Gazette*, 1896.

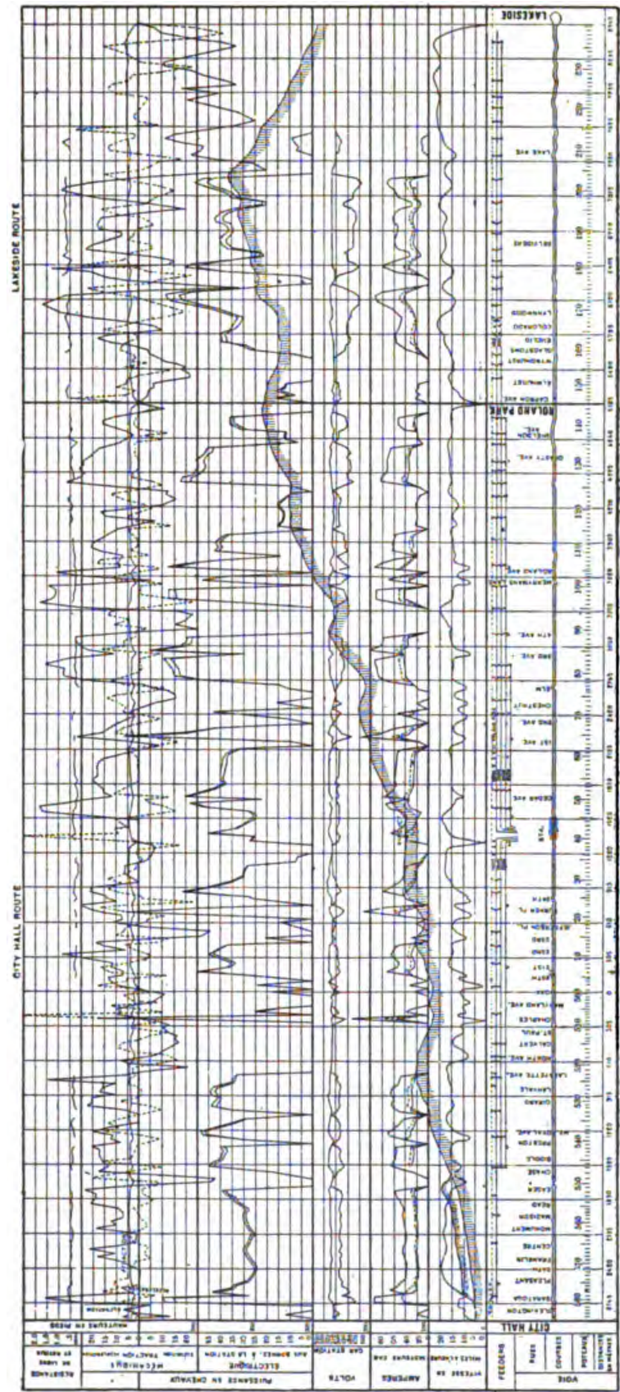


Fig. 786. — Spécimen de graphiques relevés sur les tramways de Baltimore.

Nº de l'essai			
Date			
Ligne			
Portion de la ligne où s'effectue le parcours			
Nº de la voiture			
Sens de la marche	ALLER	RETOUR	ALLER et RETOUR
Longueur totale			
— en alignement droit			
— en courbe			
Nombre de courbes			
Rayon minimum			
Longueur maxima des courbes			
Rayon moyen des courbes			
Nombre d'aiguillages			
Nombre de garages (pour une ligne à simple voie)			
Différence d'altitude entre les points extrêmes.			
Déclivité moyenne			
— maxima			
Longueur maxima des rampes			
Inclinaison moyenne du profil			
Poids de la voiture			
Nombre de voyageurs et d'employés			
Poids total			
Nombre d'arrêts			
Durée du parcours			
Durée nette en marche			
Vitesse moyenne			
Vitesse entre arrêts			
Courant moyen sur tout le parcours			
— entre arrêts			
Voltage moyen à la station pendant l'essai			
Voltage moyen sur la voiture			
Perte moyenne de voltage en ligne			
Dépense totale d'énergie			
Puissance moyenne à la voiture			
— à la station			
Puissance perdue en ligne			
Résistance moyenne de la ligne et du retour			

N° de l'essai.	Ligne parcourue.	Longueur du parcours simple.	ALLER														RETOUR													
			Heure de départ.	Heure d'arrivée.	Durée du parcours.	Vitesse moyenne correspondante.	Nombre moyen de voyageurs.	NOMBRE d'arrêts			DÉPENSE d'énergie				Habileté du mécanicien.	OBSERVATIONS	Heure de départ.	Heure d'arrivée.	Durée du parcours.	Vitesse moyenne correspondante.	Nombre moyen de voyageurs.	NOMBRE d'arrêts			DÉPENSE d'énergie				Habileté du mécanicien.	OBSERVATIONS
								complets.	partiels.	total.	totale.	par kilomètre.	par tonne-kilomètre.	Puissance moyenne entre arrêts.								complets.	partiels.	total.	totale.	par kilomètre.	par tonne-kilomètre.	Puissance moyenne entre arrêts.		

Fig. 787. — Autre spécimen de graphiques relevés sur les tramways de Baltimore.

ser des tableaux plus simples, tels que celui de la page 407, où

l'on trouvera l'aller et le retour réunis pour plus de commodité sur une même ligne.

En portant les courbes de courant correspondant à ces parcours sur un profil en long de la ligne, on obtient des graphiques de parcours normaux ; la figure 787 en donne un exemple dû à M. Hering, qui a résumé sur une seule épure les résultats comparatifs de plusieurs parcours effectués avec des voitures différentes.

Il est préférable, même dans ce cas, d'ajouter la courbe des vitesses, comme le montre la figure 788 qui résume un des nombreux graphiques relevés sur la ligne électrique de Nantasket Beach [1].

Les renseignements ont encore plus de valeur si l'on y joint l'indication de la position du régulateur aux divers points du parcours, comme le montre par exemple le diagramme de la figure 789, relevé par M. F. Ross sur les tramways de Hanovre [2].

Pour étudier plus spécialement la consommation de courant sur diverses rampes, on fera des essais spéciaux sans arrêt et répétés, et on notera soigneusement les données de l'essai, par exemple dans la forme du tableau ci-dessous.

Nº de l'essai.	Nombre de moteurs.	Nºs des voitures essayées.	Mécanicien.	Position du régulateur.	Inclinaison de la rampe en millimètres : mètre.	Longueur de la rampe.	Durée du parcours.	Vitesse correspondante.	POIDS				Voltage.	Courant.	Puissance.	Watts-heures.	Watts-heures par tonne-kilomètre.
									de l'automobile.	des voitures remorquées.	des voyageurs.	total.					

[1] Cf. N. H. Heft, *Street Railway Journal*, juin 1897.

[2] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1er avril 1897.

Si l'on calcule, d'après ces données et une étude préalable du

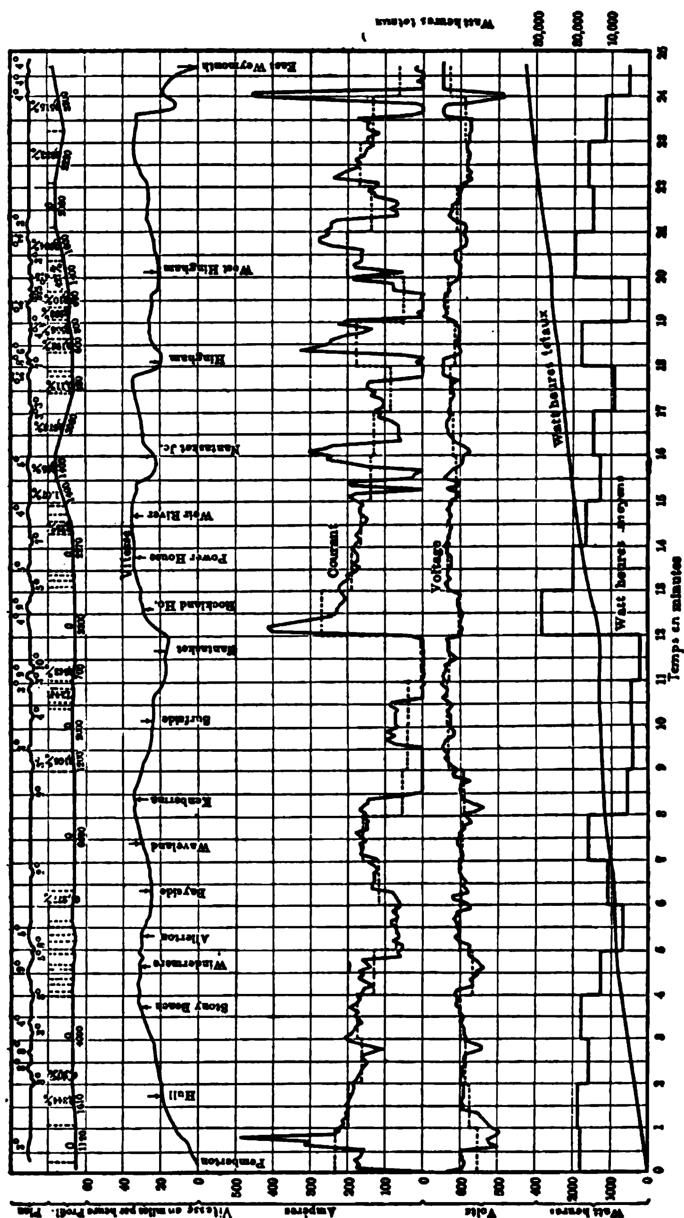


Fig. 788. — Spécimen de graphiques relevés sur la ligne électrique de Nantasket Beach.

coefficient de traction, les éléments du travail mécanique indiqués sur le graphique de la figure 788, on obtient la valeur du

rendement du matériel, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut.

Essais plus complexes. — On peut combiner ces essais de matériel roulant avec des essais de la ligne de distribution elle-même, en notant les pertes de charge le long de celle-ci d'après les voltages enregistrés à la fois sur la voiture et à l'usine en service

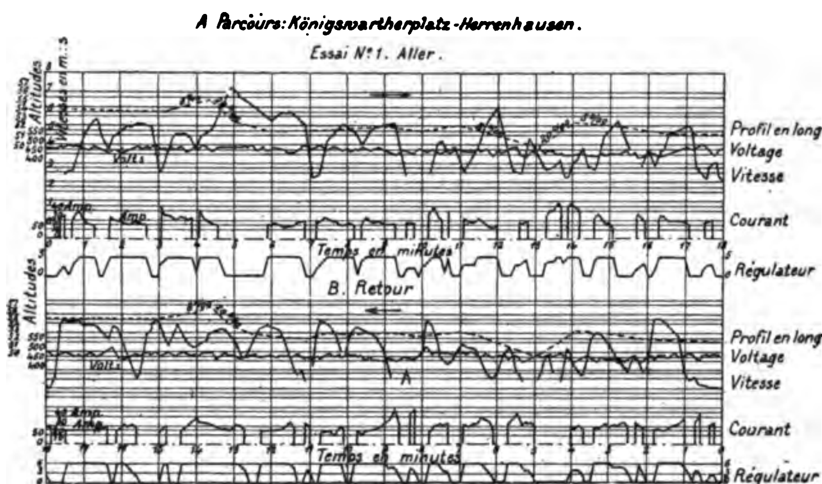


Fig. 789. — Spécimen de graphiques relevés sur les tramways de Hanovre.

normal. C'est ce qui a été fait, par exemple, par M. Hering dans les graphiques reproduits ci-dessus.

Enfin, on peut relever en même temps les dépenses d'énergie à l'usine et noter les conditions de marche des génératrices. On réalise alors un essai complet, d'où l'on peut déduire le rendement global de la distribution d'énergie depuis le cylindre de la machine à vapeur jusqu'à la jante des roues ou au crochet d'attelage. Mais ces essais sortent du cadre du présent ouvrage. On en trouvera d'excellents exemples dans les études classiques de MM. Louis Bell, (tramways de Lafayette)[1], H. S. Hering et W. S. Aldrich (chemin de fer de Neversink Mountain)[2], Shepardson et Burch (tramways de Minneapolis)[3], E. Hopkinson (chemin de fer de Bessbrook-

[1] *Electrical World*, 22 juin 1889.
[2] *Electrical World*, mai, juin et juillet 1892.
[3] *Electrical World*, 9 juillet 1892.

Newry)[1] ; bien que déjà anciennes, ces études sont restées des modèles du genre.

Essais de l'état de la voie. — Les essais dynamométriques et de consommation peuvent donner une idée de l'état plus ou moins satisfaisant d'une voie, par comparaison avec des essais faits antérieurement sur la même voie ou sur des voies analogues. Mais on a souvent intérêt à connaître cet état avec plus de précision ; on y arrive à l'aide de fourgons d'expériences construits spécialement dans ce but.

Tel est le wagon indicateur de la Chicago City Railway Co. [2], qui sert à déterminer expérimentalement les dénivellations de chaque file de rails, les diffé-

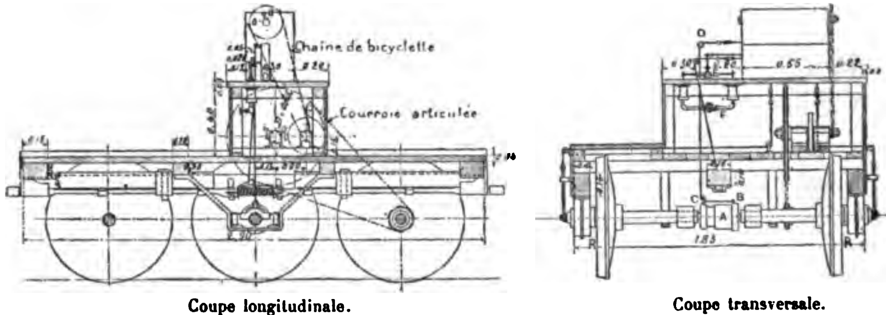


Fig. 790. — Wagon indicateur du Chicago City Railway.

rences de hauteur entre les deux files, les variations d'écartement de la voie et l'effort de traction nécessaire pour mouvoir le véhicule à une vitesse déterminée.

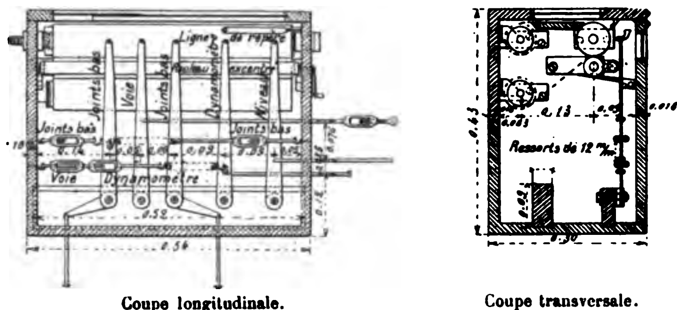
Ce wagon (fig. 790) consiste en une plate-forme montée sans suspension aucune sur deux essieux. Un troisième essieu, placé à égale distance des deux autres et dont les boites peuvent prendre un certain jeu vertical et axial dans leurs plaques de garde, reçoit toutes les vibrations produites en plan ou en profil par les irrégularités de la voie et les transmet à des styles inscripteurs; il est, à cet effet, coupé en son milieu, et entre les deux moitiés, soutenues par des paliers appropriés, se trouve intercalé un ressort spiral contenu dans une boite télescopique A.

Toute variation dans l'écartement des rails agit sur ce ressort, dont les déflexions se transmettent par l'intermédiaire d'une transmission funiculaire BCD au style inscripteur désigné par le mot *Voie* sur la figure 791. Les oscillations verticales des roues R, R, dues aux dénivellations des rails, se transmettent

[1] *Proc. Inst. of Civ. Eng.*, 6 décembre 1887.

[2] Cf. *Street Railway Journal*, novembre 1896 et juin 1897; *Street Railway Review*, décembre 1896 et janvier 1897; *Engineering News*, 14 octobre 1897.

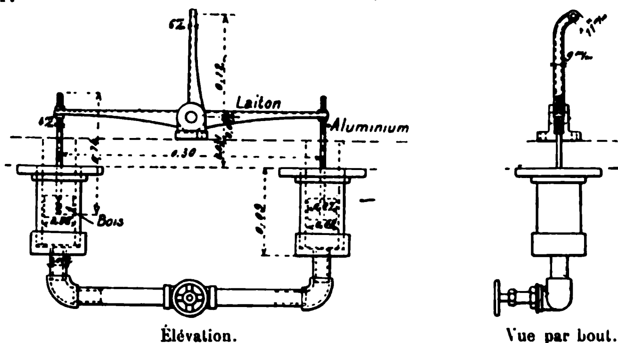
de même indépendamment l'une de l'autre, par des cordes attachées aux boîtes à graisse, aux deux aiguilles marquées *Joints bas*. Les différences de niveau entre les deux files de rails sont mesurées par les dénivellations du mercure contenu dans deux vases cylindriques communicants (fig. 792), qui renferment deux flotteurs reliés aux extrémités d'un fléau de balance E commandant le



Coupe longitudinale. Coupe transversale.

Fig. 791. — Mécanisme enregistreur du wagon indicateur du Chicago City Ry.

style *Niveau*. Quant à l'effort de traction, il est mesuré au moyen d'un ressort calibré intercalé sur la barre de traction et dont les déflexions sont communiquées au bras intitulé *Dynamomètre* par une transmission funiculaire ; cette barre se meut dans des paliers à rouleaux qui réduisent les frottements au minimum.



Élévation. Vue par bout.

Fig. 792. — Niveau à mercure actionnant la plume qui enregistre les différences de hauteur entre les deux files de rails.

A l'exception de la plume du dynamomètre, qui est commandée par une transmission rigide, chacun des styles inscripteurs est muni d'un ressort de rappel assez puissant pour maintenir toujours la corde de transmission bien tendue.

L'inscription se fait sur une bande de papier de 457 mm. de largeur, entraînée à une vitesse mille fois moindre que celle de la voiture par des rouleaux de friction actionnés par l'un des essieux au moyen d'une courroie articulée et d'une chaîne de bicyclette. Pour pouvoir changer le sens de la marche de la voiture sans modifier celui du défilement du papier, on a muni le cylindre enregistreur d'un mécanisme de renversement de marche.

La figure 793 montre un spécimen des diagrammes obtenus avec cet instrument. Avant de s'en servir, on appuie sur le papier un style fixe, qui trace une ligne horizontale servant de zéro pour le diagramme des efforts ; les autres courbes, ne représentant que des différences, ne nécessitent aucun repère.

Le poids du wagon complet est de 1 800 kg. environ. Jusqu'à ces derniers temps, il était traîné par des chevaux ; on préfère actuellement le faire remorquer par une automobile munie de moteurs spécialement construits pour les faibles vitesses. L'allure à laquelle on obtient les meilleurs diagrammes est celle de 6,5 km : h. environ. Lorsqu'on emploie le wagon dynamomètre pour

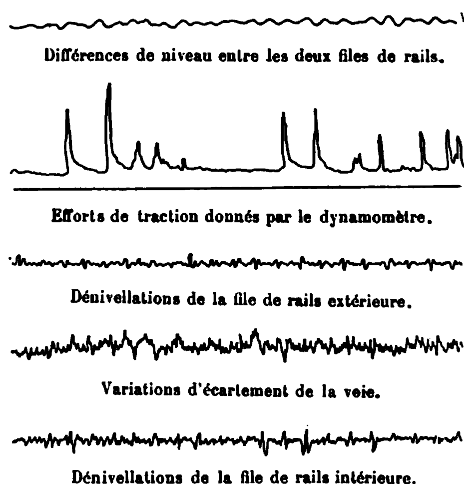


Fig. 793. — Spécimens des courbes obtenues avec le wagon indicateur du Chicago City Ry.

déterminer la résistance à la traction causée par l'affaissement des joints, il est important d'avoir des rails bien propres, car la présence de saletés sur les rails occasionne à elle seule des augmentations d'effort de traction qui peuvent aller jusqu'à 50 et 75 p. 100.

§ 5. — Spécifications de moteurs de traction

Généralités. — Les spécifications peuvent être faites à deux points de vue très différents, suivant les constructeurs auxquels elles s adressent.

Si l'on a affaire à de grandes maisons spécialistes, comme les maisons américaines, dont les matériels sont éprouvés et les ingénieurs en général beaucoup plus expérimentés que ceux des compagnies d'exploitation faisant la commande, il serait oiseux

et même un peu puéril de vouloir leur enseigner la façon d'établir leur matériel pour satisfaire à un programme donné ; le mieux est alors d'indiquer simplement les conditions de ce programme ainsi que les garanties demandées. C'est ce que font aujourd'hui en Amérique les meilleurs ingénieurs-conseils, dont les spécifications sont des modèles de concision, tout en laissant, grâce aux garanties stipulées, la responsabilité du constructeur absolument entière.

En Europe et surtout en France, où bien des constructeurs sont en retard ou peu au courant des questions de traction, une spécification détaillée peut au contraire appeler utilement leur attention sur certaines sujétions ou certaines exigences de la pratique. D'autre part, beaucoup de nos administrations publiques veulent faire elles-mêmes leurs projets et ont des habitudes de contrôle minutieux, au moins en théorie, qui forcent leurs ingénieurs à prescrire des conditions de réception assez détaillées, et il est bon dans ce cas de savoir quelles sont celles qu'on peut introduire rationnellement dans un cahier de charges.

Nous donnerons donc dans ce qui suit des exemples de spécifications des deux espèces.

Spécifications sommaires. — Si l'on laisse au constructeur l'initiative et le choix des moyens, on lui remettra un programme très précis du service prévu : poids des voitures automobiles, nombre et poids des voitures remorquées, rampe maxima, rayon minimum des courbes, vitesse maxima et vitesse commerciale, espacement et durée des arrêts, etc. Il devra s'engager à fournir un matériel qui satisfasse à ce service comme vitesse et comme puissance sans que la consommation d'énergie par voiture-kilomètre ou par tonne-kilomètre dépasse un certain chiffre de watts-heures, ni le coût d'entretien des moteurs et accessoires un certain nombre de centimes par kilomètre. Dans le cas où il s'agit seulement de la fourniture d'équipements électriques destinés à s'adapter à un matériel donné, on peut se dispenser du programme et rédiger les spécifications d'une façon analogue au modèle ci-après, qui est la reproduction d'une bonne spécification américaine d'usage courant.

MODÈLE DE SPÉCIFICATION AMÉRICAINE POUR MOTEURS

Les moteurs seront protégés par une cuirasse en acier pratiquement inaccessible à l'eau et à la poussière, percée d'une ouverture donnant un accès facile aux balais et au collecteur.

Ils seront suspendus d'un côté directement à l'essieu, de l'autre aux traverses du truck par l'intermédiaire de ressorts.

Les roues et pignons d'engrenage seront en acier doux et en acier dur respectivement et tourneront dans une boite contenant de l'huile ou de la graisse.

Tous les enroulements seront isolés de la façon la plus parfaite et leur isolement sera éprouvé à 5 000 volts alternatifs avant leur sortie de l'usine.

L'induit sera denté et bobiné avec des sections interchangeables bien isolées. Les lames du collecteur seront en cuivre étiré dur, isolées au mica ; il ne devra pas se produire d'étincelles nuisibles aux balais tant que la charge ne dépassera pas la charge normale indiquée.

Les bobines d'inducteurs devront pouvoir être retirées facilement des pôles; elles seront bien isolées et à l'épreuve de l'humidité.

La réduction de vitesse sera telle que l'effort de traction produit à la jante de roues de — m. de diamètre, à la vitesse de — km. à l'heure, soit d'au moins — kg.

Le pignon n'aura pas moins de — dents et la longueur de ses génératrices ne sera pas inférieure à — m.

Le poids du moteur complet, engrenages et boîte compris, ne dépassera pas — kg.

La température extérieure d'aucune partie du moteur (noyaux, enroulements, collecteurs) ne devra dépasser de plus de 60° C. la température ambiante, en service courant.

L'équipement électrique de chaque véhicule comprendra, en dehors des moteurs : deux régulateurs série-parallèle avec leurs rhéostats, un appareil de prise de courant, deux interrupteurs de plate-forme, un parafoudre, un interrupteur principal et une installation d'éclairage comportant 5 lampes de 16 bougies en série commandées par un interrupteur avec coupe-circuit; le cylindre inverseur sera enclenché avec le cylindre commutateur du régulateur de façon qu'il soit impossible de renverser le sens de la marche des moteurs sans que le courant soit coupé.

Tous les fils conducteurs employés sur les voitures seront étamés et isolés au moyen d'une couche de caoutchouc pur et d'une seconde couche de caoutchouc vulcanisé, le tout bien soudé ensemble et recouvert de tresse.

La consommation d'énergie au régime normal indiqué ne dépassera pas la valeur garantie de — watts-heures par voiture-kilomètre (ou — watts-heures par tonne-kilomètre).

La dépense d'entretien et de réparation des moteurs et de leurs engrenages ne dépassera pas la valeur garantie de — centimes par kilomètre parcouru.

Spécifications détaillées. — Lorsqu'on tient, malgré les observations qui précèdent, à détailler les conditions à remplir pour

préciser davantage les conditions de réception, il importe d'avoir bien en vue les conditions du service que les appareils sont appelés à fournir. Comme on l'a vu au chapitre V, la puissance en chevaux n'offre aucun intérêt direct, et les moteurs doivent être définis par leur couple et leur vitesse. En Amérique, où l'on s'est de bonne heure rendu compte de cette nécessité, on a pris l'habitude de désigner les moteurs par l'effort qu'ils peuvent produire à la jante de roues d'un diamètre donné, à une vitesse déterminée. Cette définition, dont le modèle de spécification que nous venons de donner offre un exemple, fait intervenir implicitement les engrenages ; elle ne permet donc pas une comparaison équitable entre différents moteurs ayant des coefficients de réduction différents. Il est bon, par suite, lorsqu'on fait une commande de moteurs, d'ajouter l'indication de la réduction ou, ce qui revient au même, d'indiquer le couple à réaliser sur l'arbre moteur en kilogrammètres avec la vitesse correspondante.

Le couple est limité par les étincelles aux balais et par l'échauffement (dans les moteurs cuirassés, c'est le second effet qui domine). On devra donc fixer en conséquence les courants maxima. Il sera bon dans cette indication de distinguer d'une part le régime *moyen* effectif[1], qui doit pouvoir être maintenu au moins trois heures de suite[2], ou, suivant la pratique américaine, le régime *commercial* (forcé), qui doit pouvoir être maintenu au moins une heure, et d'autre part les régimes accidentels, tels qu'il s'en produit sur les rampes et qui devront pouvoir durer au moins un quart d'heure, ou mieux le régime maximum, qu'on doit pouvoir réaliser pendant le démarrage et l'accélération au moins durant une minute[3]. Les spécifications américaines se rapportent ordinairement au seul régime commercial, mais elles sont complétées par des garanties générales suffisantes.

D'autre part, la question des variations de vitesse joue un

[1] Le courant moyen est celui qui correspond à l'effort de traction moyen, tout compris, même l'accélération. On verra au chapitre XIII comment il se détermine.

[2] Une heure n'est pas suffisante pour juger de ce régime, puisque c'est celui que le moteur doit supporter pendant toute une journée et qu'en général la température n'atteint une valeur stationnaire qu'au bout de trois heures au moins.

[3] En pratique, comme on le verra, l'accélération dure d'ordinaire moins que cela ; mais il est néanmoins prudent de prévoir une minute.

rôle important dans le service et mérite, par suite, une attention spéciale. S'il s'agit d'un moteur en série, on indiquera donc approximativement la vitesse correspondant aux régimes de courant ci-dessus ; pour le régime moyen, il sera bon de réserver la possibilité d'obtenir une vitesse supérieure de 10 à 20 p. 100 à la vitesse maxima prévue entre stations, afin de rattraper éventuellement un retard. Dans certains cas et notamment sur les chemins de fer métropolitains, il est bon de faire intervenir de préférence l'accélération, comme on le verra au chapitre XIII. En outre, on spécifiera un maximum pour la vitesse correspondant à l'effort en palier prévu. On se rappellera, s'il s'agit d'un équipement double, qu'en passant du groupement en parallèle au groupement en série, ces vitesses peuvent être réduites sensiblement de moitié et que, dans tous les cas, elles peuvent être abaissées au-dessous des valeurs spécifiées par l'adjonction d'une résistance en série.

S'il s'agit d'un moteur à excitation variable (moteur en dérivation, moteur à inducteurs shuntés, etc.), on devra spécifier le maximum de courant qu'on pourra commuter sans étincelles avec un affaiblissement de champ donné (qui sera, en général, de 20 à 30 p. 100 par rapport au champ maximum). Pour les moteurs shunt, il est bon de définir avec quelques détails les diverses excitations prévues. On trouvera un exemple de spécification de ce genre dans le cahier des charges de l'État belge pour la fourniture d'automobiles électriques donné en appendice, qui constitue à ce point de vue un bon modèle, mais qui manque peut-être un peu de précision en ce qui concerne les températures. Il n'est pas nécessaire d'ailleurs de spécifier, comme cela a été fait dans cet exemple, les rendements à tous les voltages d'alimentation, car on sait comment ils varient (p. 109) ; il est seulement intéressant de le faire pour les plus faibles tensions, qui correspondent aux rendements les moins avantageux.

Les conditions de rendement devront être bien précisées, conformément aux remarques faites plus haut, au point de vue des pertes dans les engrenages et par frottement, et en indiquant la méthode qui sera employée pour mesurer ce rendement et les régimes auxquels il sera déterminé. Il faut avoir soin de distin-

guer les rendements du moteur à froid et à chaud, c'est-à-dire après trois heures de régime moyen (température 60 à 65° C. à l'extérieur des enroulements), car l'échauffement, en augmentant les résistances, diminue notablement le rendement. Les courbes de la figure 794, qui résument des relevés faits dans les ateliers

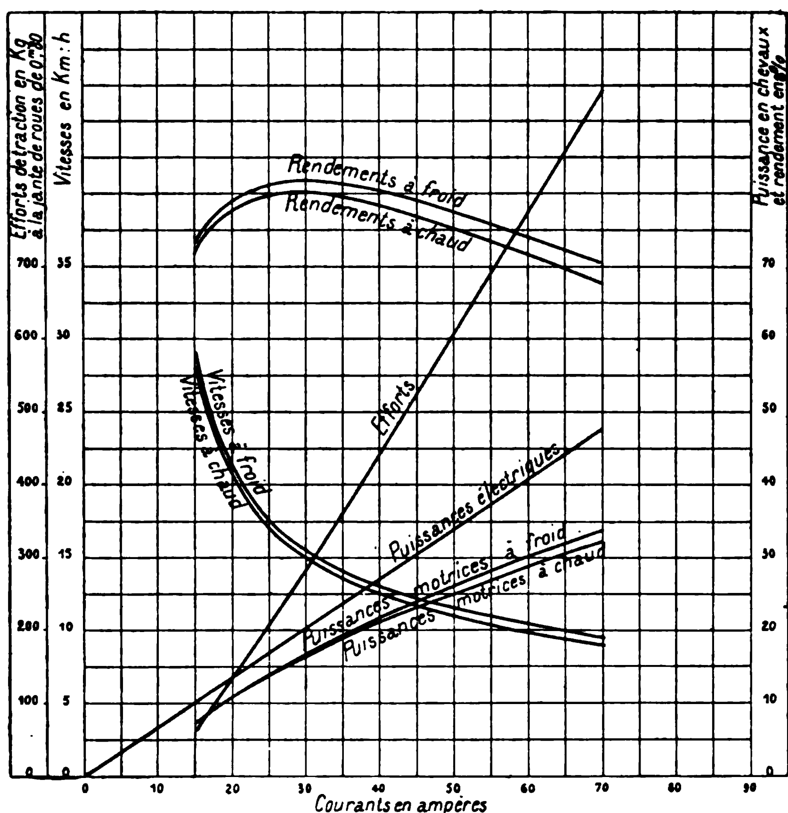


Fig. 794. — Courbes de fonctionnement du moteur Westinghouse n° 46 à froid et à chaud.

de la Compagnie Westinghouse sur un moteur de tramway de 25 chevaux, en donnent un exemple très net. Les variations d'effort et de vitesse qui résultent de l'élévation de température sont de même ordre que les variations de rendement, qui atteignent ici 2 p. 100.

Il y a souvent intérêt pour l'ingénieur qui veut acheter un matériel à spécifier de préférence les résultats à obtenir avec une

voiture tout équipée, car il laisse ainsi entière la responsabilité du constructeur et ne risque pas de faire des évaluations erronées ; dans ce cas, on peut indiquer directement la vitesse à réaliser sur les diverses rampes et les dépenses d'énergie maxima admises par tonne-kilomètre.

Pour éclaircir ces remarques, nous donnons ci-dessous un modèle de spécification technique complète, rédigé en vue de satisfaire aux desiderata précédents dans les cas usuels, avec deux rédactions à choisir, applicables l'une aux moteurs séparés, l'autre aux moteurs en place. Il va sans dire que ces types devraient être modifiés suivant les espèces et complétés au besoin. Les clauses relatives aux délais, cautionnement, conditions de paiement, etc., ne différant pas de celles qu'on insère dans les marchés ordinaires, nous ne les avons pas indiquées ; on en trouvera un exemple dans le cahier des charges de l'État belge cité plus haut.

Les spécifications de locomotives peuvent être rédigées de même, en ce qui concerne les moteurs ; on trouvera, également en annexe, un exemple de spécification américaine de cette catégorie.

MODÈLE DE SPÉCIFICATION DÉTAILLÉE

1° Pour moteurs séparés.

Fourniture. — La fourniture comprend — moteurs (avec leurs engrenages).

Ces moteurs devront s'adapter parfaitement aux trucks (châssis) dont les plans seront remis. Il y aura — moteurs par truck (châssis).

2° Pour voitures tout équipées.

Fourniture. — La fourniture comprend — voitures équipées chacune avec — moteurs et leurs accessoires consistant notamment en 1 appareil de prise de courant, 2 régulateurs avec les rhéostats correspondants, 1 parafoudre, 2 coupe-circuits, 2 interrupteurs, des conducteurs reliant la prise de courant aux moteurs et régulateurs, un circuit d'éclairage de — lampes, de — bougies protégé par 2 fusibles et 2 interrupteurs.

Voitures. — (A compléter suivant chaque espèce[1].)

[1] Il nous a paru superflu de donner ici pour les voitures un modèle de spécification qui n'aurait eu aucune utilité pratique, les conditions à remplir étant trop différentes d'une localité à l'autre, suivant les habitudes du public, les règlements de police, le

Moteurs. — Les moteurs seront tétrapolaires [1] avec (ou sans) pôles conséquents, à cuirasse pratiquement étanche [2].

La longueur disponible sur l'essieu pour le montage d'un moteur et de ses engrenages est de — m. La hauteur totale ne devra pas dépasser — m., ni la distance entre la partie la plus basse du moteur et le niveau des rails descendre au-dessous de — m. Des dessins d'ensemble des moteurs seront fournis par le constructeur.

La cuirasse aura un plan de section suivant l'horizontale (ou à 45°); elle protégera le moteur contre la poussière et l'humidité et sera munie d'un judas pour l'inspection du collecteur et d'une trappe à fermeture étanche pour la visite de la partie inférieure.

Les pièces polaires donneront un champ neutre assez étendu et la réaction d'induit sera assez faible pour que le moteur puisse commuter sans étincelles nuisibles jusqu'à — ampères. L'entrefer devra être le plus grand possible et d'au moins 3 mm.

Les bobines d'inducteurs seront interchangeables et faites à la machine ; elles devront pouvoir être retirées facilement des pôles.

L'induit sera denté et bobiné en tambour avec sections interchangeables (ou en anneau). Les sections seront isolées au mica (ou à l'amiante)

Moteurs. — (Comme au modèle n° 1.)

service à fournir, etc. L'étude détaillée que nous avons faite plus haut (ch. VII) des diverses parties d'une automobile électrique permettra d'ailleurs facilement d'indiquer ces conditions dans chaque cas particulier de manière à satisfaire aux exigences locales. On trouvera, en outre, en appendice dans le tome I deux exemples de spécifications de caisse, l'une pour une ligne américaine, l'autre pour la ligne de Paris-Romainville, et un modèle de spécification de truck.

[1] Pour les moteurs de locomotives puissantes on pourra admettre le type hexapolaire.

[2] On peut admettre et même recommander la cuirasse ouverte sur les chemins de fer.

et recouvertes d'un enduit isolant imperméable; elles seront connectées en polygone étoilé.

Le collecteur n'aura pas moins de — touches[1]. Les lames du collecteur, en cuivre pur, seront isolées par des feuilles de mica du Canada et serrées avec interposition d'isolant entre deux portées coniques disposées de façon à empêcher toute pénétration d'huile sous les barres. Les lames seront courbées et les connexions avec les fils d'induit faites par soudures (ou par vis). Les balais seront en charbon et les porte-balais disposés de façon à permettre de régler la pression des balais sur le collecteur et de les resserrer au fur et à mesure de l'usure, ainsi que de les changer facilement.

Les bobines d'inducteurs et d'induit seront à l'épreuve de l'humidité et de la chaleur. (Elles devront pouvoir supporter sans inconvénient une température de 100° C. pendant six heures. Leur isolement sera suffisant pour résister à une épreuve par courants alternatifs à la tension de 4 000 volts entre le noyau de fer et l'âme de l'enroulement[2].)

Tous les matériaux employés seront de la meilleure qualité ; les induits seront en tôle douce très mince, les inducteurs en acier doux de haute perméabilité, les enroulements en fil de cuivre électrolytique recuit, les collecteurs en cuivre pur étampé ou étiré dur, les balais en charbon, les arbres d'induit en acier, les coussinets en bronze (ou en métal blanc).

Les arbres ne devront pas avoir

[1] Il est bon, en général, que la différence de potentiel entre deux lames consécutives dans un moteur de traction ne dépasse pas 15 à 20 volts; mais les étincelles aux balais dépendent de bien d'autres conditions qu'il n'y a pas lieu de spécifier.

[2] Voir page 373. Les constructeurs européens acceptent difficilement les conditions entre parenthèses, qui sont au contraire courantes en Amérique.

moins de — cm. de diamètre, ni les portées dans les paliers moins de — cm. Les coussinets présenteront une surface frottante étendue et seront lubrifiés aussi parfaitement que possible. Ils seront munis d'un évent et d'une collerette du côté de l'induit de façon à empêcher toute pénétration de lubrifiant à l'intérieur du moteur.

Le poids d'un moteur et de ses engrenages, y compris la roue d'essieu et la boîte d'engrenages, ne dépassera pas — kg.

Le poids du moteur devra être reporté en aussi grande partie que possible sur le truck (châssis) par l'intermédiaire de tampons élastiques.

Régimes. — Chaque moteur devra pouvoir développer pendant au moins trois heures un couple normal de — kgm. sur l'arbre moteur sans que l'échauffement fasse augmenter les résistances d'induit et d'inducteur de plus de 25 p. 100, ou la température extérieure d'aucune partie (noyaux, enroulements, collecteur) de plus de 60° C. au-dessus de la température ambiante. La vitesse correspondante sera d'environ — tours par minute et le courant ne devra pas dépasser — ampères sous (500) volts.

Le rendement mesuré à chaud entre les bornes et l'essieu, en déduisant les pertes dans les engrenages et en supposant négligeable le frottement des coussinets de guidage, ne sera pas inférieur à

80 p. 100 (moteurs en série)
76 p. 100 (moteurs shunt) [2]

Régimes. — La voiture équipée avec ses moteurs devra pouvoir développer les efforts à la jante et vitesses ci-après, avec des roues de — m. et des engrenages dont la réduction soit au plus de 5,5 :

En palier :
effort, — kg. ; vitesse, — km : h. ;

Sur rampe de — mm. :
effort, — kg. ; vitesse, — km : h. ;
effort maximum (pendant 1 minute), — kg. [1].

(La suite comme au modèle n° 1.)

[1] Ou bien on peut simplement dire que le pouvoir accélérateur des moteurs devra être suffisant pour permettre d'amener la voiture à la vitesse de — km : h. en 20 secondes par l'emploi normal du régulateur série-parallèle.

[2] Il s'agit ici de moteurs de tramways ordinaires ; pour les gros moteurs, on prendra 85 p. 100 et 80 p. 100 respectivement.

(Dans le cas de la régulation par le champ) la vitesse sous le courant normal et à la tension de (500) volts devra pouvoir être accrue de 30 p. 100 par réduction de l'excitation sans qu'il y ait de crachements nuisibles aux balais.

Le moteur devra pouvoir, immédiatement après l'essai précédent, fournir sans dégradation pendant quelques minutes (1 ou 2) un régime de courant triple du courant moyen défini plus haut (ou double du courant commercial), sans que l'augmentation de résistance dépasse 35 p. 100, ni l'élévation de température d'aucune partie (noyaux, enroulements, collecteurs) 120° C. au-dessus de la température ambiante.

La vitesse correspondant à un courant double du courant normal ne devra pas s'abaisser de plus de 30 p. 100 au-dessous de la vitesse normale, ni la vitesse correspondant à un courant moitié dépasser de plus de 60 p. 100 la vitesse normale [1].

Les rendements correspondant aux régimes double et moitié ne devront pas être inférieurs de plus de 8 à 10 p. 100 au rendement mesuré en charge normale (en conservant mêmes unités).

Les moteurs seront livrés par paires portant un numéro commun et soigneusement appareillées; les deux moteurs de chaque paire devront, s'ils sont alimentés en parallèle et tournent à la même vitesse, ne pas présenter d'inégalité de courants supérieure à 5 p. 100; de même, associés en série, ils ne devront pas présenter de différence de plus de 5 p. 100 entre leurs tensions aux bornes.

[1] Ces relations peuvent être modifiées suivant les cas d'après le degré de saturation désiré.

Engrenages. — La réduction de vitesse ne devra pas dépasser 5,5 : 1 (ou un autre rapport approprié suivant le cas). Le pignon sera en acier comprimé ou taillé à la machine et la roue en acier (ou à la rigueur en fonte). La longueur des génératrices du pignon ne sera pas inférieure à 3/2 de son diamètre ; le nombre de ses dents sera d'au moins —.

La denture sera à profil de développante ; les dents seront droites (ou à chevrons).

Les engrenages tourneront à bain d'huile dans une boîte étanche en métal peu sonore, fixée solidement contre la cuirasse du moteur, et ne devront produire ni vibrations ni bruit exagéré.

Tous les boulons et écrous seront rendus indéserrables.

Engrenages. — (Comme au modèle n° 1.)

Garantie d'entretien. — Les frais d'entretien et de réparation des moteurs et des engrenages seront garantis à un maximum de — centimes par kilomètre parcouru dans des conditions régulières d'entretien.

Garantie d'entretien. — (Comme au modèle n° 1.)

Appareils accessoires. — Les *régulateurs* seront du type série-parallèle à deux manettes (ou autre). Les étincelles de rupture devront être rendues inoffensives par l'un des procédés connus. Les frotteurs présenteront la forme la plus commode et les contacts auront une section suffisante pour ne pas donner lieu à des échauffements dangereux pendant le fonctionnement.

Les divers contacts seront séparés verticalement par des cloisons en substance isolante réfractaire. Les frotteurs et les bagues seront soigneusement isolés ; la résistance entre deux quelconques d'entre eux et entre chacun d'eux et la masse ne sera pas inférieure à 1 mégohm.

Les manettes seront enclenchées de façon à éviter toute fausse manœuvre pouvant détériorer les appareils.

L'*appareil de prise de courant* sera exécuté avec les meilleurs matériaux conformément à la pratique acquise pour ce genre d'instrument et soigneusement isolé de la voiture.

Les *rhéostats* seront de préférence en tôle ou feuillard de fer avec isolation au mica ou à l'amiante suivant la forme la plus convenable et ventilés de façon que leur température intérieure ne dépasse pas 400° après qu'on y aura fait passer pendant un quart d'heure le courant normal, puis pendant quelques minutes un courant triple [1]. Ces résistances seront mises à l'abri de l'humidité et de la rouille.

Les *câbles de connexion* de la voiture devront être en cuivre électrolytique recuit; chaque fil sera étamé et isolé au caoutchouc à 500 mégohms par kilomètre au moins ; sa section sera calculée en vue d'une densité de courant moyen [2] de 1,5 ampères par millimètre carré, qui pourra être portée à 2 ampères par millimètre carré pour les câbles qui ne sont pas continuellement en service (ceux qui servent au fonctionnement du rhéostat).

Ils seront enfermés soit dans un tuyau de plomb ou de fonte ou dans une moulure en bois, soit sous une enveloppe flexible et pratiquement étanche.

Les *interrupteurs* de plate-forme devront être bien isolés à l'aide de substances incombustibles. Ils devront pouvoir couper le plus fort courant prévu sans formation d'arcs

[1] Sur les lignes en pente où les rhéostats sont employés d'une façon permanente pour le freinage, il faut les calculer plus largement.

[2] Voir la définition du courant moyen à la page 417.

Réception. — Les essais de réception seront les suivants :

1° Vérification de l'isolement et des résistances des moteurs ;

2° Vérification des vitesses obtenues sous les divers courants indiqués ;

3° Vérification des échauffements et des rendements à ces divers régimes.

Les résistances seront mesurées à froid et à chaud au pont de Wheatstone ; les isolements seront éprouvés par un transformateur à 4 000 volts et un voltmètre approprié.

Les rendements seront déterminés par la méthode de — sur chaque

persistants ni détérioration de l'appareil.

Les *coupe-circuits* pourront être électromagnétiques ou formés d'un plomb fusible. Ceux du premier type devront être bien accessibles et pourront être confondus avec un interrupteur de plate-forme ; ils devront pouvoir être réglés de façon à se déclencher sous un courant supérieur de 10 p. 100 seulement au courant maximum admis. L'un et l'autre seront bien isolés par des substances incombustibles et ne devront donner lieu à aucun arc ; ils seront placés hors de portée des voyageurs.

Le *parafoudre* sera de l'un des meilleurs types en usage et devra exiger le moindre entretien possible ; il devra pouvoir supporter sans visite 10 décharges ordinaires consécutives. Il sera complété par une bobine de self-induction préservant les moteurs et sera isolé par des substances incombustibles.

Aucun des instruments accessoires ne devra pouvoir occasionner de secousse ni de brûlure aux voyageurs ; leur emplacement sera choisi en conséquence.

Réception. — (Comme au modèle n° 1).

Les rendements seront déterminés en watts-heures dépensés par tonne-

paire de moteurs à la fois en les accouplant par les deux pignons et l'une des roues d'essieu.

Ces essais seront exécutés, soit dans les ateliers de la Compagnie, soit dans ceux du constructeur, par un ou deux agents délégués de chacune des parties, avec des instruments agréés par les deux parties et étalonnés sur la demande de l'une ou de l'autre par le Laboratoire central d'Electricité ou le Bureau de contrôle de la Chambre syndicale, des Industries électriques, aux frais du fournisseur.

Le constructeur devra, en outre, fournir les courbes de fonctionnement complètes de l'un des moteurs, indiquant en fonction du courant la vitesse, le couple et le rendement (pertes dans les engrenages déduites).

kilomètre pendant des parcours à vitesse uniforme sur des parties de voie de déclivité sensiblement constante en rails du type —.

4° Vérification de l'isolement des accessoires par les méthodes ordinaires.

(La suite comme au modèle n° 1.)

Les régulateurs et accessoires seront, s'il y a lieu, soumis à des essais de bon fonctionnement et d'isolement suivant les procédés ordinaires.

(La fin comme au modèle n° 1).

CHAPITRE XIII

RÉSISTANCE ET TRACTION DU MATÉRIEL ROULANT ÉLECTRIQUE

Généralités. — Dans l'établissement d'un projet de traction mécanique, il est nécessaire d'évaluer, au moins approximativement, le travail nécessaire à la traction. Avec la traction électrique, il est rationnel de faire cette évaluation sous forme électrique ; c'est donc cette méthode que nous emploierons par la suite. Mais auparavant, pour analyser les divers éléments de la perte d'énergie, il est bon de considérer la question au point de vue ordinaire, c'est-à-dire mécanique.

§ 1. — Travail mécanique nécessaire a la traction

Dans ce paragraphe nous serons plus sobres de détails que dans les suivants et nous nous attacherons seulement à donner les renseignements les plus récents, en renvoyant pour l'étude complète des principes et les expériences anciennes aux traités généraux sur la traction [1] ; nous étudierons en même temps la traction des tramways, qui n'y figure point. Dans tous les cas, nous distinguerons les résistances des véhicules *ordinaires* et celles des véhicules *moteurs*.

Eléments composant l'effort résistant d'un véhicule ordinaire. — Si l'on-considère une voiture d'attelage ordinaire, sup-

[1] Voir en particulier le magistral traité de Couche, *Voie, Matériel roulant et Exploitation technique des chemins de fer*, et, comme ouvrage plus récent, celui de MM. Deharme et Pulin, *Matériel roulant, Résistance des trains, Traction.*

posée remorquée par une voiture automobile sur une rampe d'angle α, il faut, pour entretenir sa marche pendant un instant très court à une certaine vitesse constante v, dépenser une puissance égale au produit de cette vitesse par la force F appliquée à la voiture suivant une direction parallèle à l'axe de la voie. Cette force F, que nous appellerons l'effort de traction, sera, dans le cas le plus général, une fonction de la vitesse, et il importe, avant toutes choses, de savoir l'évaluer.

D'une manière générale, pendant un instant dt, le travail de

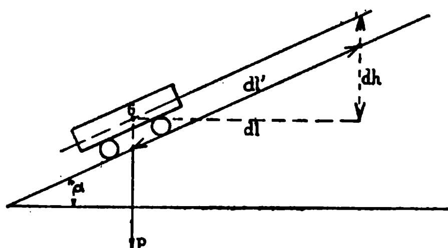


Fig. 795. — Décomposition du travail de traction en rampe.

traction est la somme du travail de la résistance passive R à vaincre pour produire le roulement en palier sur un parcours dl' (fig. 795), du travail à développer pour soulever le poids P de la voiture de la hauteur dh dont elle s'élève pendant le temps considéré, de la résistance de l'air Z et enfin de l'augmentation de force vive communiquée à sa masse $\frac{P}{g}$; au total

$$dT = Rdl' + Pdh + Zdl' + \frac{P}{g} vdv.$$

Si l'on divise les deux membres de cette relation par la longueur dl' du chemin parcouru pendant le temps dt, il vient pour valeur de la force appliquée

$$\mathfrak{R} = R + P \frac{dh}{dl'} + Z + \frac{P}{g} v \frac{dv}{dl'}$$

$$= R + P \sin\alpha + Z + \frac{P}{g} \frac{dv}{dt}.$$

Pour les déclivités ordinaires, c'est-à-dire ne dépassant pas 10 p. 100, on peut, en ne commettant qu'une erreur inférieure à

1 p. 100, remplacer sin α par l'inclinaison i égale à la tangente du même angle, au lieu de la valeur exacte $\frac{i}{\sqrt{1+i^2}}$. D'autre part, la résistance n'est pas la même suivant que le parcours se fait en alignement droit ou en courbe; il convient donc de la diviser en deux termes, l'un R_r afférent à la marche normale, l'autre R_c représentant l'excédent dû à l'effet des courbes.

On a ainsi la valeur approchée pratique

$$\mathfrak{R} = R_r + Z + Pi + R_c + \frac{P}{g}\frac{dv}{dt}.$$

Parmi les termes du second membre, les deux premiers seuls restent sensiblement les mêmes à vitesse constante dans toutes les conditions. Nous les appellerons, pour ce motif, *résistances normales*. Les autres ne se présentent qu'accidentellement, lorsqu'on se trouve en rampe, en courbe ou au moment d'un démarrage, et nous les appellerons *résistances supplémentaires*.

La résistance au roulement R_r est généralement considérée comme proportionnelle au poids de la voiture P[1] multiplié par un coefficient r qu'on appelle coefficient de traction. Ce n'est là qu'une transformation algébrique, car ce coefficient r peut être fort différent pour des types de voitures dissemblables ayant cependant même poids; mais on peut en déterminer empiriquement la valeur moyenne pour les types usuels. On pose de même $R_c = Pc$ et l'on arrive ainsi à l'équation de forme simple

$$\mathfrak{R} = P\beta = P\left(\rho + \frac{Z}{P} + i + c + \frac{1}{g}\frac{dv}{dt}\right), \qquad (89)$$

en appelant β un coefficient global. Examinons successivement les différents termes du second membre.

Résistance au roulement. — Le coefficient de traction r dépend de la valeur des frottements auxquels donne naissance le déplacement de la voiture, c'est-à-dire :

Le frottement des essieux dans leurs paliers;

Le frottement de roulement des roues sur les rails, englobant

[1] Plus exactement, il faudrait prendre seulement la composante P cos α normale à la voie; mais, en général, α est assez petit pour qu'on puisse supposer cos α = 1.

en outre empiriquement les effets de la flexion des rails à la rencontre des joints et des corps étrangers;

Le frottement de glissement des roues sur les rails provenant des patinages partiels et du mouvement de lacet.

Si l'on appelle r', r'', r''' les trois termes correspondant à ces trois frottements, on a

$$\rho = r' + r'' + r'''.$$

Sur une bonne voie sèche, les deux derniers termes doivent être négligeables à côté du premier. C'est à peu près ce qui a lieu sur les chemins de fer, mais il en est autrement sur les voies de tramways, ainsi qu'on va le voir.

L'effort produit tangentiellement aux fusées par leur *frottement sur les coussinets* est, comme on le sait, sensiblement égal à Pf, en appelant f le coefficient de frottement des métaux en présence ; cet effort rapporté à la jante des roues est réduit dans le rapport des diamètres de la fusée d et de la roue D, c'est-à-dire qu'il devient $f\frac{d}{D}P$; d'où, par unité de poids,

$$r' = f\frac{d}{D}.$$

On peut le diminuer beaucoup en faisant $\frac{d}{D}$ assez petit; mais il ne faut pas perdre de vue que le coefficient de frottement f tend à décroître lorsqu'on augmente la vitesse de déplacement des surfaces, qui est proportionnelle à d, et qu'on réduit la pression, laquelle est inversement proportionnelle à d. On est d'ailleurs limité dans la réduction du diamètre d par la nécessité d'assurer la solidité de l'essieu et le graissage des fusées, de sorte qu'on ne dépasse pas, en général, comme nous l'avons dit plus haut (t. I, p. 301), une pression de 20 à 25 kg. par centimètre carré de surface d'appui. Les valeurs pratiques moyennes de $\frac{d}{D}$ relevées sur le matériel existant des tramways électriques sont de 0,07 à 0,08 pour les voitures d'attelage, de 0,09 pour les automobiles à voie étroite et de 0,10 à 0,11 pour les automobiles à voie normale.

Le coefficient f atteint quelquefois 0,05, mais il peut être abaissé pratiquement à 0,02 ou 0,015 par un bon graissage, comme celui qu'on réalise sur le matériel des chemins de fer.

En faisant le produit $f\frac{d}{D}$, on trouve ainsi pour les automobiles de tramways

$$r' = 0{,}0015 \text{ à } 0{,}0020;$$

on adoptera le chiffre inférieur pour les voitures d'attelage.

Sur les chemins de fer, on admet pour les voitures ordinaires $\frac{d}{D} = \frac{1}{11}$ et $f = \frac{1}{70}$ à $\frac{1}{60}$; d'où $r' = 0{,}0014$ à $0{,}0015$. On peut donc conserver ce dernier chiffre pour toutes les voitures d'attelage sans distinction.

Il faut remarquer que dans le matériel ordinaire des chemins de fer l'effort nécessaire pour vaincre le frottement des fusées sur les coussinets est notablement plus grand au démarrage qu'en marche. Par exemple, d'après des essais d'atelier récents de la Compagnie du Nord français, dont M. Barbier a bien voulu nous communiquer les résultats, la résistance d'une voiture de 12 t. atteindrait 140 kg. dans le premier cas, au lieu de 20 seulement dans le second. Cette différence semble provenir, au moins en partie, du défaut de lubrifiant entre les fusées et les coussinets au moment du départ; il est nécessaire, en effet, dans les boîtes à graissage inférieur, que les fusées aient fait au moins un demi-tour avant que l'huile amenée par le tampon vienne jouer son rôle et faire baisser brusquement le coefficient de frottement.

L'emploi de coussinets à rouleaux permettrait d'abaisser les chiffres relatifs à r', surtout au départ, par suite de l'effet que nous venons de signaler.

On aurait constaté, par exemple, sur le tramway électrique de Ryde [1] que les paliers à rouleaux Meneely économisaient 24 p. 100 du coefficient de traction en marche normale et 50 p. 100 de la dépense d'énergie au démarrage; toutefois, ces résultats paraissent peu vraisemblables. D'après des essais exécutés en Amérique sur les paliers à rouleaux Mossberg par la C[ie] Westinghouse et par la C[ie] des tramways d'Attleboro [2], la réduction du frottement r' pourrait atteindre 40 p. 100. Enfin, d'après M. Bayley Marshall, des paliers à rouleaux qu'il a expérimentés économiseraient 60 p. 100 en marche et 84 p. 100 au démarrage.

Ces paliers doivent donc offrir un certain avantage toutes les fois que les autres résistances sont assez faibles pour laisser un rôle relativement important au coefficient r'.

On attribue, d'autre part, à leur emploi une économie d'huile qui atteindrait 50 p. 100.

[1] *Engineering*, 29 mars 1895.

[2] *Street Railway Journal*, février 1897.

Malgré ces avantages, on n'a pu encore introduire d'une façon définitive le système des paliers à rouleaux ni sur les tramways, ni sur les chemins de fer ordinaires ; dans ces deux applications, les difficultés d'entretien de ces appareils ont plutôt paru de nature à les faire rejeter. Ainsi, sur les tramways de Paris et du département de la Seine, après un essai prolongé du coussinet Hyatt, on l'a finalement abandonné, comme nous l'avons dit plus haut (t. I, p. 302). Même sur les lignes métropolitaines à faibles déclivités et à vitesse modérée, où le frottement des fusées peut jouer un rôle plus sensible dans l'effort de traction total, l'effort supplémentaire d'accélération étudié plus loin accroît tellement le coefficient moyen qu'on est en droit de se demander si l'avantage des paliers à rouleaux n'est pas illusoire ; aussi ne les voit-on employés sur aucun des « Elevated » américains, où tous les éléments de la dépense d'énergie sont pourtant analysés avec beaucoup de précision.

Il nous paraît donc prudent d'attendre avant de porter un jugement sur ce système les résultats d'une expérience plus prolongée, et nous nous bornerons à compléter ce que nous venons de dire des essais rapportés par M. Bayley Marshall[1]. Sur une voiture de tramway de 4 t., au lieu de 20 kg. de résistance par tonne, on aurait trouvé avec des paliers à rouleaux 3 kg. seulement environ ; on aurait observé une réduction de 30 p. 100 dans l'énergie totale dépensée sur le tramway de Blackpool et de 12,5 à 15 p. 100 sur un train de chemin de fer qui circule depuis deux ans entre Brighton et Kemp Town. D'après le même auteur, le chemin de fer aérien de Liverpool aurait, après essais, adopté les paliers à rouleaux pour son nouveau matériel, de même que le Waterloo and City Railway de Londres. On les essaye également sur le City and South London Railway et sur l'Ouest français.

On appelle, comme on le sait, *frottement de roulement* l'effort tangentiel équivalent, comme couple résistant autour de l'essieu, à l'effet du déplacement de la réaction normale des rails à une faible distance en avant des roues. Ce frottement r'' est à peu près négligeable pour le matériel des chemins de fer, où le chiffre de 0,001 admis autrefois est considéré aujourd'hui comme exagéré ; il est plus fort pour le matériel des tramways, dont les voies sont moins soignées, et varie, du reste, beaucoup suivant le profil des rails, leur état plus ou moins imparfait de propreté et les conditions atmosphériques. On admettra les chiffres suivants pour les temps ordinaires, rails secs :

0,0015 à 0,003[2]	sur rails	Vignole,
0,003 à 0,004	—	à gradin,
0,004 à 0,005	—	Marsillon, Haarmann, etc.,
0,006 à 0,007	—	Broca, Phœnix, etc.

[1] *Proc., Inst. Civ. Eng.*, 27 mai 1897, et *British Association*, Toronto, août 1897.

[2] Au lieu d'exprimer le coefficient de traction en millièmes, on l'énonce plus géné-

L'humidité produite par le brouillard, la boue, la neige rend le rail glissant et amène des *patinages partiels* des roues qui consomment du travail en pure perte ; on peut traduire cette perte sous forme d'une augmentation r''' du coefficient de roulement. Il est difficile de l'évaluer avec précision, mais cette augmentation est très notable en cas de mauvais temps. Le mouvement de lacet donne lieu à une perte analogue et également peu précise.

Résistance de l'air. — La résistance de l'air, négligeable sur les

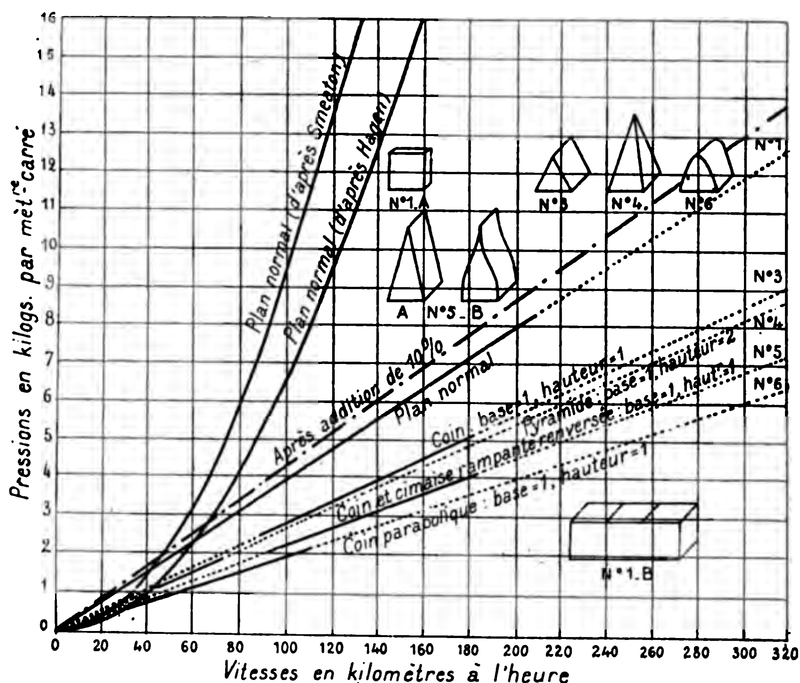


Fig. 796. — Courbes expérimentales de résistance de l'air aux grandes vitesses, montrant l'influence de la forme de la surface d'attaque.

tramways à traction animale, prend une valeur souvent importante sur les tramways électriques à cause des vitesses plus grandes réalisées. Sur les chemins de fer, elle joue un rôle prépondérant.

Cette résistance provient, comme pour les navires, de la déflexion des filets fluides à l'avant, de leur frottement sur les parois

ralement en kg. par tonne, ce qui revient au même; on dira, par exemple, qu'il est de 1,5 à 3 kg. par tonne sur rails Vignole.

latérales et enfin du remous à l'arrière. Il est difficile de séparer ces divers éléments de la résistance ; mais les frottements latéraux sont négligeables avec le matériel roulant ordinaire et les deux autres éléments peuvent être déterminés en bloc par des mesures empiriques. C'est leur somme que nous appellerons Z.

D'après une loi de Newton, cette résistance Z serait proportionnelle à la surface S frappant l'air et au carré de la vitesse V, et l'on pourrait écrire

$$Z = \lambda SV^2;$$

S étant exprimé en mètres carrés et V en mètres par seconde, Z est mesuré en kilogrammes avec $\lambda = 0{,}08$ environ.

Jusqu'aux vitesses de 50 km : h. environ (14-15 m. par seconde), cette formule, bien que théoriquement fort imparfaite, est suffisamment vérifiée pour la pratique de la traction par les expériences de Langley, de MM. Cailletet et Colardeau, etc.

Au delà de 50 km : h., divers expérimentateurs, et en particulier M. Crosby, ont cru trouver que la résistance croît moins vite que le carré de la vitesse. MM. Cailletet et Colardeau arrivent à une conclusion contraire.

La figure 796 résume graphiquement les expériences de M. Crosby[1]. Ces résultats sont contredits par les expériences de Langley[2], qui semblent établir la loi du carré jusqu'aux vitesses de 108 km : h., et par celles de Smeaton et de Hagen, d'après les-

[1] « An experimental study of atmospheric resistance », par M. O. T. Crosby, *Engineering*, 30 mai, 6 et 13 juin 1890. Ces expériences ont été exécutées en faisant tourner un mobile autour d'un arbre vertical mû par un moteur à vapeur et dont on comptait le nombre de tours ; ce mobile était relié par un système de tringles à deux colliers fous sur l'arbre ; la résistance opposée par l'air à son mouvement se transmettait par l'intermédiaire d'un ressort calibré à une plaque enregistreuse rattachée par un second système de tringles à deux autres colliers calés invariablement sur le même arbre et sur laquelle un style inscrivait les déflexions du ressort. On ajoutait 10 p. 100 aux chiffres trouvés pour tenir compte des frottements des colliers et du ressort, de la résistance de l'air sur les tringles et du mouvement général de rotation pris par l'air de la chambre d'expériences. Les vitesses ont varié entre 15 et 200 km : h. Dans cet intervalle, comme le montre la figure, la relation entre la vitesse et la pression mesurée sur la surface de front suit une loi linéaire, que M. Crosby représente, pour les vitesses comprises entre 50 et 200 km : h., par la formule $P = 0{,}1441\ V$ (P étant exprimé en kg. par cm^2 et V en m : s.).

Les valeurs ainsi trouvées concordent bien avec les chiffres obtenus entre 80 et 95 km : h. par le même expérimentateur, à l'aide d'une méthode toute différente, dans les essais de traction à grande vitesse qui ont été décrits au chapitre VIII (p. 4) ; pour ces derniers essais, il employait un véhicule automoteur muni d'une tête mobile que la pression de l'air appuyait sur un ressort calibré.

[2] *Société française de physique*, 18 mars 1892.

quelles ont été tracées les deux courbes supérieures de la figure 796 ; mais ils trouvent, d'autre part, un certain appui dans les résultats publiés par M. Desdouits[1].

D'après les expériences faites par cet éminent spécialiste sur les chemins de fer de l'État, l'accroissement de résistance totale suivrait une loi sensiblement hyperbolique ($R = a + \sqrt{b + cV^2}$), représentée par la courbe de la figure 797 entre 0 et 80 km : h. ; la résistance augmente depuis une valeur initiale de 3 kg. par tonne jusqu'à 12 kg. à la vitesse maxima.

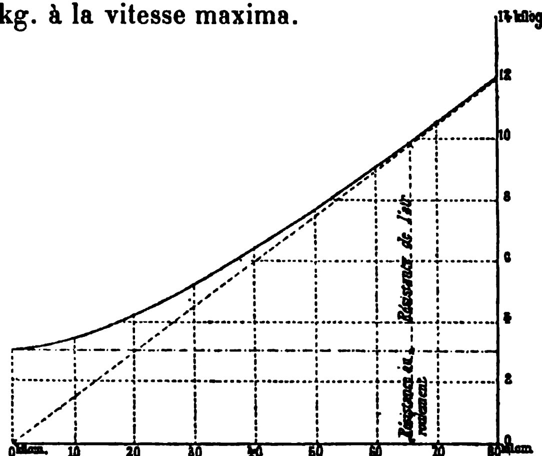


Fig. 797. — Résistance par tonne d'une machine à voyageurs marchant à régulateur fermé, d'après M. Desdouits.

Poids de la machine 36 t., du tender 19 t., total 55 t.

En pratique, on peut substituer à l'arc de courbe une parabole, pour les vitesses comprises entre 0 et 40 km : h., en posant

$$r = 0{,}1\ V^2,$$

et admettre au delà une variation de résistance proportionnelle à celle de la vitesse, en posant

$$r = 2{,}3\ (V - a),$$

V étant évalué en mètres par seconde et la surface de front étant prise égale à la moyenne de 6 m².

L'augmentation de résistance ainsi mesurée comprend les pertes dues aux chocs et réactions du rail, aux mouvements de lacet et aux effets pneuma-

[1] *Revue générale des chemins de fer*, 1890, p. 286 ; Deharme et Pulin, *loc. cit.*, p. 39 et suivantes.

tiques dans les cylindres[1]; mais M. Desdouits a employé une locomotive dont les tiroirs avaient un jeu de soulèvement suffisant pour éviter les effets pneumatiques, et il estime que ces divers éléments accessoires sont à peu près négligeables en comparaison de la réaction atmosphérique et que celle-ci représente la presque totalité de la résistance; il en trouve une preuve dans ce fait qu'à la vitesse de 60 km : h. une locomotive seule a une résistance de 9 kg., tandis qu'une seconde locomotive placée derrière la première n'a plus que 4 kg. de résistance; la différence de 1 kg. par rapport à la résistance de 3 kg. constatée à faible vitesse peut être attribuée à l'effet de l'air sur les parties non masquées des véhicules consécutifs.

Nous accepterons ici la loi de Newton.

Dans le cas d'une voiture se déplaçant dans l'air en repos avec une paroi plane à l'avant[2] et à l'arrière, le coefficient λ a, d'après Poncelet, la valeur pratique 0,088 jusqu'à 50 km : h. ou, d'après Langley, la valeur 0,07 à 0,09 jusqu'à 108 km : h.

D'après les belles expériences de MM. Cailletet et Colardeau à la tour Eiffel[3], ces chiffres seraient exagérés et l'on aurait entre 0 et 25 m. par seconde seulement $\lambda = 0{,}071$.

Pour d'autres formes de l'avant de la voiture, λ prend des valeurs différentes. On aurait, par exemple, les valeurs suivantes par rapport à celle du plan prise comme unité :

Forme de l'avant.	D'après Gaudard.	D'après Borda.	D'après Crosby.
Dièdre $\left(\operatorname{tg} \frac{1}{2} \alpha = \frac{3}{4}\right)$[4].	»	»	0,40
Pyramide à base carrée.	»	»	0,35
Demi-cylindre.	0,66	0,57	»
Hémisphère	0,50	0,41 à 0,36	0,40
Cône d'angle 90°. . . .	0,60	»	»
— — 60°. . . .	0,54	»	»
Ogive de hauteur égale à la base	»	»	0,50

[1] Dans les expériences exécutées sur les chemins de fer où l'on mesure ordinairement la résistance d'une locomotive préalablement lancée, on éprouve quelque difficulté à séparer la résistance due à la réaction de l'air des autres résistances complexes de cette locomotive, qu'on mesure seulement à régulateur fermé, ce qui peut introduire d'importantes causes d'erreur.

[2] Lorsque la surface de front est formée d'échelons successifs, c'est-à-dire de plusieurs plans verticaux parallèles, ce qui arrive, par exemple, pour les locomotives munies d'une cabine restreinte, on peut admettre comme résultat d'expérience que la résistance totale est très sensiblement la même que pour une surface unique, égale à la projection de l'ensemble.

[3] *Société française de physique*, 4 novembre 1892.

[4] α étant l'angle au sommet du dièdre.

Jusqu'ici ces coefficients n'ont guère d'intérêt pratique que pour la traction sur les chemins de fer. La locomotive Heilmann a, comme on le sait, un avant en forme de coin, et des formes analogues ont été adoptées dans tous les projets de véhicules à grande vitesse. D'après M. Desdouits, l'emploi de formes appropriées pour la surface d'attaque permettrait de gagner au moins 40 p. 100 sur

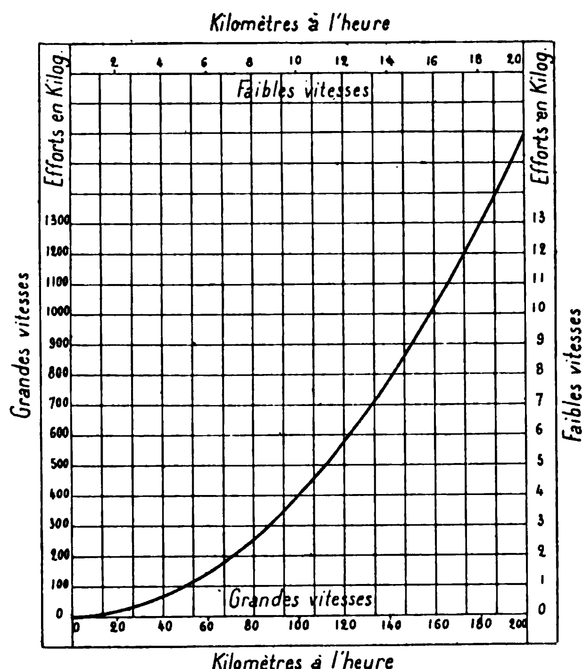


Fig. 798. — Résistance du vent sur une surface de front de 6,5 m² à différentes vitesses entre 0 et 20 km : h. et entre 0 et 200 km : h.

la résistance du véhicule de tête et 8 à 10 p. 100 sur celle d'un train express tout entier; cette conclusion a été vérifiée par une expérience exécutée aux chemins de fer de l'État.

Les voitures ordinaires de tramways offrent généralement au vent une surface normale de 6,20 à 6,60 m², qui s'élève jusqu'à 8,50 et 9 m² pour les voitures à impériale. En prenant comme moyennes les chiffres de 6,50 et 9 m² respectivement, on obtient les résultats portés au tableau de la page suivante.

La courbe de la figure 798 représente graphiquement les valeurs de la première colonne de ce tableau et peut s'appliquer aussi bien

au matériel de chemins de fer, qui a de 5 à 7 m² de surface de front.

VITESSE		EFFORT TOTAL EN KG. d'après la formule $Z = 0{,}088\ SV^2$	
en kilomètres : heure	en mètres : seconde	Voiture sans impériale ($S = 6{,}5\ m^2$)	Voiture à impériale ($S = 9\ m^2$)
6	1,66	1,43	1,97
8	2,22	2,56	3,53
10	2,78	4,02	5,55
12	3,33	5,77	7,96
16	4,44	10,25	14,14
20	5,56	16,07	22,18
25	6,95	25,12	34,66
30	8,33	36,08	49,79
35	10,72	59,75	82,45
40	11,11	64,2	88,60
45	12,77	84,8	117,0
50	13,88	100,2	138,3
55	15,27	121,2	167,3
60	16,66	144,3	199,1
65	18,05	169,4	233,8
70	19,44	196,5	275,1
75	20,83	225,6	315,8
80	22,22	256,7	359,3
85	23,61	289,8	405,6
90	25,54	338,1	473,3
95	26,38	361,9	499,4
100	27,76	400,7	553,0
110	30,55	485,3	669,7
120	33,33	577,7	797,2
130	36,11	678,0	935,6
140	38,88	786,0	1084,7
150	41,66	902,5	1245,5
175	48,61	1228,7	1695,6
200	55,55	1604,6	2214,3

On voit qu'à partir de 10 à 12 km. à l'heure, la résistance de l'air n'est déjà plus négligeable. On pourra admettre qu'elle est de 6 à 9 kg. sur les lignes urbaines françaises avec voitures à impériale, où la vitesse moyenne est de 12 km : h., ce qui fait à peu près 1 kg. par tonne s'il s'agit d'une automobile ordinaire pesant 6 à 9 t. ; il faut compter le double hors des villes, parce que la vitesse y est ordinairement de 35 à 40 p. 100 plus élevée qu'à l'intérieur.

Lorsque au lieu d'une automobile isolée, on a un train de deux ou plusieurs voitures, celles qui suivent la première offrent un

supplément de résistance à l'air, provenant de ce que celui-ci s'infléchit au passage du vide compris entre les voitures.

Cette réaction atmosphérique, dont l'accroissement en fonction de la vitesse est très sensible, se mesure par différence en comparant à la même vitesse la résistance d'un train complet et celle de la locomotive seule. Le diagramme de la figure 799 résume les résultats ainsi obtenus par M. Desdouits sur deux trains d'expérience, formés l'un de 8 véhicules du type ordinaire, l'autre de 3 voitures à bogies pesant le même poids total, 75 t. Ces courbes montrent que le matériel à bogies devient plus avantageux que le matériel ordinaire aux vitesses supérieures à 20 km : h.; à la vitesse de 80 km : h., le premier

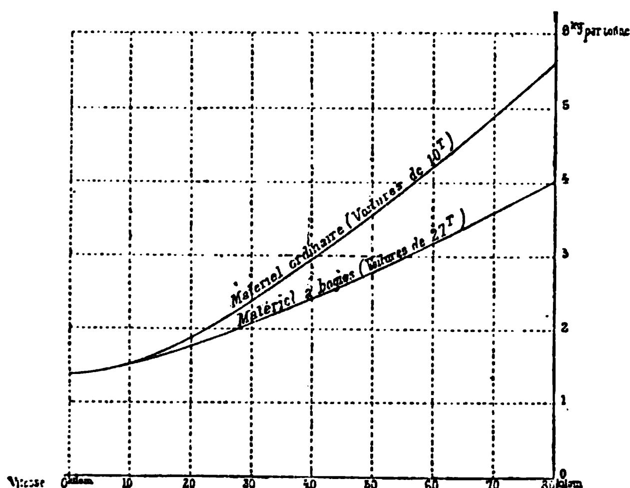


Fig. 799. — Résistance totale à la traction en kg. par tonne de voitures remorquées (non compris la résistance de la locomotive), d'après les expériences de M. Desdouits sur les chemins de fer de l'État.

n'offre qu'une résistance de 4 kg., au lieu de 5,5 kg. pour le second, soit près de 30 p. 100 de réduction. Cette différence, qui ne peut provenir que de la réaction de l'air, puisqu'elle n'apparaît pas aux faibles vitesses, s'explique par la réduction du nombre des intervalles entre voitures dans le rapport de 7 à 2. En supprimant tout intervalle, par l'emploi de prolongements en tôle par exemple, on réduirait le coefficient à 0,65 (au lieu de 0,70) de sa valeur pour le matériel ordinaire. Au contraire, si l'on donne au matériel à bogies des plates-formes découvertes et très développées, la résistance peut devenir égale ou même supérieure à celle des voitures habituelles. De même, si, dans un train mixte ou de marchandises, on intercale des wagons plats, la résistance des wagons suivant immédiatement ceux-ci peut être doublée ou triplée ; dans certaines expériences de M. Desdouits où l'on mettait les wagons plats par paires, elle était même quadruplée.

La protection d'un wagon sur le suivant s'annule pratiquement à une distance égale à 5 fois sa dimension transversale.

Avec des véhicules espacés de 1 m. environ, nous admettrons, comme on le fait pour les trains de chemin de fer, que, pour les voitures suivant la première, la résistance de l'air est réduite à 0,10 ou 0,12 de sa valeur normale. Cela revient à ajouter à la surface d'attaque S autant de fois 0,80 m² environ (ou en chiffres ronds 1 m²) qu'il y a de voitures d'attelage.

Lorsque le vent souffle dans la direction de la voie, mais en sens opposé à la marche des voitures, avec une vitesse v, il faut remplacer dans la formule V^2 par $(V + v)^2$. On prendrait, au contraire, $(V - v)^2$ si le vent soufflait dans le sens de la marche.

Pour les directions obliques, il est assez difficile d'évaluer l'effet du vent, mais cet effet est toujours sensible ; on peut, par approximation, prendre pour valeur de v la projection du vent suivant l'axe de la voie.

D'après M. G. Pellissier[1], l'influence du vent suffirait à expliquer les variations de courant de 4 ou 5 ampères que l'on constate souvent sans cause apparente sur des voitures circulant sur une ligne de résistance uniforme.

Résistance due à la pesanteur. — Sur les tramways, on calculera simplement la résistance due à la pesanteur par l'expression donnée plus haut Pi ou plus exactement $\frac{Pi}{\sqrt{1 + i^2}}$.

Sur les chemins de fer, d'après l'observation directe, la résistance totale d'un train où intervient la composante de la pesanteur est inférieure à la valeur théorique sur les rampes, et au contraire supérieure à cette valeur sur les pentes ; cela provient de ce que, sur ces dernières, les attelages étant moins tendus et les véhicules moins bien dirigés, un plus grand nombre de boudins de roues viennent frotter contre les rails[2]. On peut tenir compte de cette circonstance empiriquement avec une précision suffisante en remplaçant la résistance *exacte* due à la pesanteur $\pm i$ par une résistance fictive $\pm 0,9\ i$, dans les limites de -5 à $+5$ mm. par mètre.

[1] *Industrie Électrique*, 10 et 25 novembre 1894.

[2] Voir Couche, *Voie, matériel roulant et exploitation des chemins de fer*, t. III ; Deharme et Pulin, *Matériel roulant et traction ;* Barbier, *Revue générale des chemins de fer*, avril 1897.

Résistance due aux courbes. — Le frottement supplémentaire *c* qui se produit dans les courbes provient des glissements nécessaires pour compenser l'inégalité des chemins parcourus par les deux roues et plus encore de la rigidité des essieux dans les types de voitures à essieux parallèles; celle-ci donne de l'obliquité à la roue par rapport aux rails et cause une sorte de coincement du mentonnet; il se produit enfin un frottement du mentonnet contre le rail du côté où la voiture se trouve rejetée par la force centrifuge.

L'importance de ces frottements est d'autant plus grande que le rayon de courbure est plus petit. Les tramways, présentant des rayons beaucoup plus faibles que les chemins de fer, donnent lieu de ce chef à des résistances souvent très considérables, surtout lorsque l'ornière des rails est sale.

On peut les réduire beaucoup par l'emploi des trucks à essieux convergents et notamment des trucks articulés ou bogies décrits plus haut (t. I, p. 285). Il est à recommander également de remplacer les courbes à rayon unique par des courbes à courbure progressive, ce qui réduit beaucoup les chocs et les frottements.

On pourrait aussi obtenir une réduction de l'effort de traction en mouillant ou en graissant les rails ; c'est ainsi que MM. G.-D. Shepardson et E.-P. Burch ont constaté [1] que l'effort de traction sur le rail extérieur passait de 300 kg : t. environ à 181 et même 136 kg : t. par mouillage, puis graissage. Mais ce procédé n'est guère pratique et d'ailleurs il risque de faire patiner les voitures qui remorquent une lourde charge.

Sur les chemins de fer, on peut admettre, d'après des expériences connues, les valeurs suivantes [2] :

Rayons.	Efforts.
800 m.	0,50 kg. par tonne.
600 —	1,00 — —
500 —	1,25 — —
400 —	2,00 — —
300 —	3,00 — —
200 —	4,00 — —
150 —	6,00 — —

[1] *Electrical World*, 9 juillet 1892.

[2] Rapport de la Commission des courbes de faible rayon, *Congrès international des chemins de fer*, 1892.

La résistance ne semble pas varier avec la vitesse jusqu'à 45 km : h. Elle croît avec le coefficient de frottement des bandages sur les rails, ce qui occasionne des différences souvent considérables suivant que les rails sont secs ou humides; c'est pourquoi à Lausanne les voitures sont munies de boîtes à eau pour mouiller les rails en courbes. Le graissage des boudins entraîne aussi une réduction notable de résistance. Le dévers, quand il atteint 0,16, la réduit également dans une proportion très sensible. La forme des bandages peut enfin avoir une grande influence.

Comme l'a fait ressortir la Commission des courbes de faible rayon, on peut très bien, en pratique, lorsque le tracé le demande, admettre pour les lignes à faible circulation, malgré l'augmentation du coefficient de traction que nous venons de signaler, des rayons de 150 et même 100 m. dans les courbes en voie normale avec le matériel roulant ordinaire des chemins de fer. Il convient seulement d'employer des raccordements paraboliques et de limiter la vitesse à des maxima réduits, qui, d'après les expériences, sont pour le matériel à essieux rigides de 35 km : h. dans les courbes de 150 m. de rayon et de 20 km : h. dans celles de 100 m.; ces limites peuvent être dépassées avec le matériel à bogies.

Pour les tramways, il n'existe pas de bonnes expériences sur l'effort supplémentaire dû aux courbes. On sait seulement que la majoration peut être très grande pour les petits rayons : avec la voie ordinaire et le matériel à essieux rigides, on a vu c atteindre jusqu'à 20 kg : t.

Sur rails Vignole, on peut adopter avec une exactitude suffisante, pour tous les matériels, la formule suivante de M. Desdouits, établie pour les voitures de chemins de fer à essieux rigides :

$$c = 500 \frac{e}{R} \text{ kg : t.},$$

en désignant par e et R la largeur de la voie et le rayon de courbure en mètres. Pour les rails d'autre type, on pourrait poser de même empiriquement

$$c = k \frac{e}{R},$$

k étant un coefficient dépendant à la fois de la voie et du matériel.

Pour les voitures à faible empattement et les courbes de petit

rayon des tramways, le coefficient 500 de la première formule paraît plutôt fort, et, sur les rails à ornière, avec matériel à essieux rigides, l'expression

$$c = 300 \text{ à } 400 \frac{e}{R} \text{ kg : t.}$$

nous semble concorder assez bien avec les résultats d'expérience. Par exemple au Havre, avec des trucks genre Taylor de 2 m. d'empattement, en courbe de 12 m. de rayon, l'accroissement de résistance est seulement de 20 à 25 kg. par tonne.

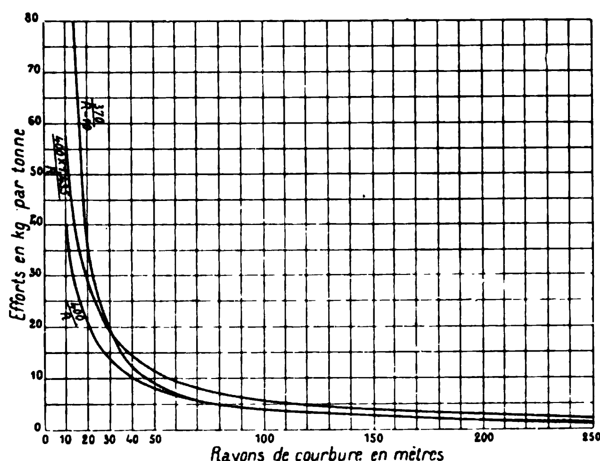


Fig. 800. — Efforts supplémentaires en courbe déterminés d'après différentes formules.

Pour les tramways à voie normale et les rails à ornière, on a proposé aussi la formule [1]

$$c = \frac{370}{R-10} \text{ kg : t.,}$$

imitée d'une formule de Rochl pour les locomotives de chemins de fer. Mais elle donne des valeurs trop fortes pour les petits rayons et la précédente permet plus facilement de tenir compte de la réduction de résistance due à l'emploi de trucks à essieux convergents. Les données expérimentales font malheureusement défaut jusqu'ici sur ce dernier point. Sur les chemins de fer, d'après M. Desdouits, la différence entre le matériel ordinaire et le maté-

[1] Cf. P. Dupuy, *la Traction Électrique*.

riel à bogies n'apparaît pas dans les courbes de 200 m., à la vitesse de 20 km : h. ; mais dans les courbes raides des tramways, la réduction deviendrait bien plus sensible.

Le tableau ci-dessous et le graphique de la figure 800 résument comparativement les résultats que donnent ces diverses formules sur les tramways pour des rayons de 0 à 300 m. et des largeurs de voie de 1 et de 1,44 m.

RAYON de courbure R en mètres.	EFFORT SUPPLÉMENTAIRE EN KG. PAR TONNE		
	Formule $\frac{400\,e}{R}$		Formule $\frac{370}{R-10}$
	$e = 1$,m.	$e = 1,44$ m.	
10	40	57,4	∞
15	26,6	38,26	74
20	20	28,7	37
25	16	22.96	25
30	13,3	19,13	19
35	11,6	16,4	15
40	10	14,35	12
50	8	11,48	9
60	6,6	9,56	7,5
70	5,7	8,2	6
80	5	7,17	5
90	4,4	6,37	4,5
100	4	5,74	4
150	2,6	3,82	2,6
200	2	2,87	1,9
250	1,6	2,29	1,5
300	1,3	1,91	1,2
400	1	1,43	0,9
500	0,8	1,14	0,7

On voit que la formule de gauche donne des chiffres moins élevés que celle de droite dans les faibles rayons, pour lesquels la seconde semble exagérée, tandis qu'elle donne des chiffres un peu plus forts dans les grands rayons.

Résistance due à l'accélération. — L'effort nécessaire pour les démarrages dépend uniquement de l'accélération admise. Si l'on suppose celle-ci constante et qu'on appelle t la durée du démarrage et v la vitesse à obtenir, l'effort est

$$\frac{1}{g}\,\frac{V}{t}.$$

Le parcours *e* de la voiture se faisant pendant ce temps à la vitesse moyenne $\frac{V}{2}$, on a

$$t = \frac{2e}{V}.$$

L'effort peut donc s'écrire aussi

$$\frac{1}{g}\,\frac{V^2}{2e}.$$

Le travail dépensé est

$$\frac{1}{2}\,\frac{P}{g}\,V^2$$

et la puissance pendant le démarrage a pour valeur *moyenne*

$$\frac{1}{2}\,\frac{P}{g}\,V^2 : \frac{2e}{V} = \frac{P}{g}\,\frac{V^3}{4e}.$$

On verra tout à l'heure comment elle est limitée par l'adhérence.

Le tableau de la page 448 indique, pour diverses valeurs de la vitesse à atteindre et du parcours admis, les accélérations moyennes correspondantes et les efforts qui s'en déduisent.

L'hypothèse d'une accélération constante qui conduit à ces chiffres et qu'on admet d'ordinaire n'est pas toujours la plus exacte, car, ainsi qu'on le verra d'après des courbes expérimentales (p. 525), la vitesse varie suivant une loi sensiblement exponentielle et sa courbe représentative se rapproche bien plutôt d'une parabole que d'une ligne droite. Nous étudierons avec détails au § 2, III, la forme de ces courbes.

Si la vitesse était représentée en fonction du temps par une parabole ayant pour axe l'axe des temps [1], l'accélération et la vitesse s'exprimeraient en fonction du temps par les formules paraboliques :

$$v = V_0\sqrt{\frac{t}{t_0}},$$

$$A = \frac{dv}{dt} = \frac{V_0}{2\sqrt{t_0 t}}.$$

D'où l'expression du parcours

$$e = \frac{V_0}{\sqrt{t_0}}\,\frac{2}{3}\,t^{3/2},$$

[1] C'est là une hypothèse extrême, car elle suppose l'accélération infinie au début du démarrage ; nous ne la donnons donc qu'à titre de comparaison.

EFFORTS ET PARCOURS PENDANT LE DÉMARRAGE

VITESSE ATTEINTE		EFFORT SUPPLÉMENTAIRE d'accélération (supposée uniforme) en kg. par tonne. Formule $a = \frac{1000}{g} \frac{V'_0}{t} = 102 \frac{V''_0}{t}$				PARCOURS DE DÉMARRAGE EN MÈTRES — Dans le cas de la loi linéaire. Formule $e = \frac{V'_0 t}{2}$				PARCOURS DE DÉMARRAGE EN MÈTRES — Dans le cas de la loi parabolique. Formule $e = \frac{2}{3} V'_0 t$			
En kilomètres à l'heure V_0	En mètres par seconde V'_0	5 sec. $a = 20,4 \times V'_0$	10 sec. $a = 10,2 \times V'_0$	15 sec. $a = 6,8 \times V'_0$	20 sec. $a = 5,1 \times V'_0$	5 sec.	10 sec.	15 sec.	20 sec.	5 sec.	10 sec.	15 sec.	20 sec.
8	2,222	45,3	22,6	15,0	11,3	5,55	11,10	16,66	22,22	7,40	14,80	22,22	29,55
9	2,500	51,0	25,5	17,0	12,7	6,25	12,50	18,75	25,00	8,33	16,66	25,00	33,25
10	2,777	56,65	28,3	19,0	14,1	6,94	13,88	20,83	27,77	9,25	18,50	27,77	36,93
11	3,055	62,3	31,0	20,7	15,5	7,63	15,26	22,90	30,55	10,17	20,34	30,55	40,63
12	3,333	68,0	34,0	22,6	17,0	8,33	16,66	25,00	33,33	11,10	22,20	33,33	44,32
13	3,611	73,6	36,8	24,5	18,4	9,00	18,00	27,00	36,11	12,02	24,04	36,11	48,02
14	3,888	79,3	39,6	26,4	19,8	9,72	19,44	29,15	38,88	12,95	25,90	38,88	51,71
15	4,166	85,0	42,5	28,3	21,2	10,40	20,80	31,25	41,66	13,87	27,74	41,66	55,41
16	4,444	90,6	45,3	30,2	22,6	11,00	22,00	33,33	44,44	14,80	29,60	44,44	59,10
17	4,720	96,3	48,1	32,0	24,0	11,80	23,60	35,40	47,20	15,71	31,42	47,20	62,77
18	5,000	102,0	51,0	34,0	25,5	12,50	25,00	37,50	50,00	16,65	33,30	50,00	66,50
19	5,277	107,6	53,8	35,9	26,9	13,20	26,40	39,60	52,77	17,57	35,14	52,77	70,18
20	5,555	113,3	56,7	37,7	28,3	13,90	27,80	41,65	55,55	18,50	37,00	55,55	73,88
21	5,833	119,0	59,5	39,6	29,8	14,60	29,20	43,75	58,33	19,42	38,84	58,33	77,58
22	6,111	124,6	62,3	41,5	31,1	15,30	30,60	45,85	61,11	20,35	40,70	61,11	81,27
23	6,388	130,0	65,0	43,4	32,5	16,00	32,00	47,90	63,88	21,27	42,54	63,88	84,96
24	6,666	136,0	68,0	45,3	34,0	16,66	33,32	50,00	66,66	22,20	44,40	66,66	88,66
25	6,944	142,0	71,0	47,2	35,5	17,40	34,80	52,20	69,44	23,12	46,24	69,44	92,35
30	8,333	170,0	85,0	56,6	42,5	20,80	41,60	62,50	83,33	27,75	55,50	83,33	110,83
35	9,725	198,0	99,0	66,0	49,5	24,30	48,60	72,95	97,25	32,40	64,80	97,25	129,34
40	11,111	226,0	113,0	75,5	56,5	27,70	55,40	83,33	111,11	37,00	74,00	111,11	147,77
45	12,500	255,0	127,0	85,0	63,5	31,20	62,40	93,75	125,00	41,63	83,26	125,00	166,25
50	13,888	283,0	141,0	96,0	70,5	34,70	69,40	104,15	138,90	46,25	92,50	138,88	184,71

qui, pour $t = t_0$ (parcours total de démarrage), devient

$$e = \frac{2}{3} V_0 t_0,$$

au lieu de

$$\frac{V_0 t_0}{2}.$$

Le parcours est ainsi réduit de $\frac{1}{3}$ par rapport à celui calculé dans la première hypothèse ; les valeurs correspondantes sont résumées à droite du tableau précédent.

Quant à la valeur de la puissance à chaque instant, elle est

$$\frac{PA}{g} v = \frac{PV_0^2}{2gt_0};$$

équivalente à la puissance moyenne avec l'accélération uniforme.

La substitution de la loi réelle à la loi linéaire pour la variation de la vitesse change la longueur du parcours, mais elle ne modifie pas sensiblement la puissance consommée pendant celui-ci et pas du tout l'énergie totale nécessaire. On est ainsi en droit de calculer dans tous les cas ces quantités en attribuant à la vitesse une valeur moyenne $\frac{V_0}{2}$ et à l'accélération une valeur moyenne $\frac{V_0}{t_0}$, V_0 étant la vitesse finale. C'est ce que nous ferons dans ce qui suit, pour éviter l'hypothèse d'une accélération infinie au début qui cadre mal avec les conditions pratiques.

Ordinairement, pour les automobiles de tramways urbains, la durée totale d'accélération est voisine de 15 secondes ; les vitesses atteintes étant, suivant les cas, de 10 à 16 km : h., on doit compter, d'après le tableau, sur un effort supplémentaire moyen de 20 à 30 kg : t.

Sur les lignes électriques d'intérêt local à arrêts peu fréquents, ces valeurs peuvent encore être suffisantes, car elles permettent d'atteindre une vitesse de 30 à 40 km : h. en 30 à 50 secondes : c'est beaucoup plus que ce qu'on réalise dans la traction à vapeur, où l'on ne dépasse guère 25 kg : t., comme on le verra ci-dessous.

Au contraire, sur les chemins de fer métropolitains ou de banlieue à arrêts très rapprochés et à vitesse commerciale élevée, l'accélération au démarrage doit être considérable et exige des efforts supplémentaires extrêmement importants. Pour atteindre, en effet, en 30 à 35 secondes les vitesses de marche de 35 à

40 km : h. qui sont nécessaires, il ne faut pas moins de 40 à 60 kg : t. Ces chiffres sont, ainsi que nous le dirons plus loin, ceux qu'on réalise sur les métropolitains électriques américains ; de même, sur le City and South London Ry., l'effort d'accélération moyen est de 40 kg : t. environ pour une durée de 40 à 50 secondes.

Comme on le voit, l'effort d'accélération peut devenir tout à fait prépondérant relativement à l'effort de traction et il constitue, par suite, un élément des plus importants dans la valeur de l'effort moyen sur tous les réseaux urbains ou suburbains. Sur certaines lignes métropolitaines, il absorbe à lui seul plus de 65 p. 100 de l'énergie totale dépensée. Dans ces conditions, il nous paraît impossible de le faire entrer avec quelque précision dans la détermination de l'*effort moyen* total, et nous préférons, dans ce qui va suivre, établir cet effort moyen, déduction faite de l'accélération, et calculer à part l'énergie nécessaire pour celle-ci d'après les conditions très variables de fréquence d'arrêts et de vitesse de marche spéciales à chaque exploitation.

Résistance à la traction d'une automobile actionnée par ses moteurs. — La résistance d'une automobile considérée comme un véhicule traîné par ses moteurs est composée des mêmes termes que celle d'une voiture d'attelage, à la seule différence que la valeur de certains de ces termes peut être modifiée : par exemple, le diamètre des roues n'est pas forcément le même, les fusées des essieux sont renforcées, etc. En outre, lorsque les moteurs ne sont pas entièrement suspendus au truck, comme cela a lieu pour un grand nombre de types, ils exercent une pression plus ou moins importante sur leurs coussinets de guidage, et, comme ceux-ci sont moins bien lubrifiés que ceux des boîtes à graisse et que l'essieu a un diamètre très supérieur à celui des fusées, le frottement correspondant peut être relativement très notable. On peut admettre, pour les moteurs suspendus par le nez (voir t. I, p. 127), que l'augmentation qui en résulte sur le coefficient total peut atteindre 0,5 à 1,5 kg. par tonne.

Ce fait a été bien mis en évidence par les expériences de la Cie des tramways de Paris et du département de la Seine [1] sur son nouveau type de voiture des

[1] Cf. Sarcia, Tramways à accumulateurs, *Industrie Électrique*, 10 décembre 1895.

lignes de Saint-Denis, où presque tout le poids des moteurs est reporté sur l'essieu (1 000 kg. sur 1 200). On a constaté, en effet, qu'avec un poids de 12 t., le coefficient de traction total sur rails Broca atteignait 7,57 kg : t. seulement, au lieu de 8,55 kg : t. sous une charge de 8,5 t.

Si l'on appelle P le poids de la voiture en tonnes, p la partie du poids des moteurs portée par les coussinets de guidage, β' le coefficient de traction en palier pour les $(P - p)$ tonnes reposant sur les fusées, et β'' le coefficient de traction en palier pour les p tonnes reposant sur l'essieu, l'effort total en palier est

$$(P - p)\beta' + p\,\beta''$$

et le coefficient de traction moyen qu'on mesure

$$\beta' + \frac{p}{P}(\beta'' - \beta').$$

Il doit donc bien diminuer avec p, comme l'indique l'expérience susmentionnée[1].

Le coefficient de roulement global ρ pourra ainsi avoir une valeur un peu différente de celle qui convient à une voiture d'attelage ordinaire; mais cette différence est, dans bien des cas, pratiquement négligeable. Par exemple, M. H. S. Hering a trouvé, en remorquant successivement sur rails Vignole une voiture d'attelage et une voiture automobile dont les engrenages avaient été enlevés, les coefficients de 4,30 et 4,37 kg. par tonne respectivement.

Tous les auteurs font entrer dans le coefficient de traction des automobiles les frottements du mécanisme moteur, c'est-à-dire des engrenages. C'est là pour nous une conception tout à fait inexacte dans le cas d'une automobile actionnée par son moteur et qui con-

[1] Celle-ci donne les deux relations :

$$\beta'\left(1 - \frac{2}{12}\right) + \frac{2}{12}\beta'' = 7{,}57,$$
$$\beta'\left(1 - \frac{2}{8{,}5}\right) + \frac{2}{8{,}5}\beta'' = 8{,}55,$$

qui conduiraient aux valeurs assez peu vraisemblables

$$\beta' = 4{,}90,$$
$$\beta'' = 20{,}90.$$

La seconde est évidemment exagérée. Cela tient à ce qu'on a eu le tort de vouloir englober dans le coefficient de traction les pertes intérieures du moteur, qui en modifient complètement la signification.

duit à de sérieuses erreurs de principe, que nous signalerons en leur lieu.

Les pertes dans les engrenages ne sont pas constantes, en effet, mais varient dans de grandes limites avec la charge : il suffit pour s'en rendre compte de jeter un coup d'œil sur les courbes de pertes du moteur G.E. 1000 (fig. 160) ; cela se conçoit, du reste, aisément, parce que le frottement est proportionnel à la pression des dents et par suite à l'effort transmis. C'est donc une erreur de vouloir le représenter par le produit du poids de la voiture par un coefficient fixe. En tout cas, ce n'est pas la voiture qui offre cette résistance au roulement, puisque c'est le pignon qui mène la roue dentée lorsque les moteurs fonctionnent, tandis que l'inverse a lieu lorsque les moteurs ne sont pas alimentés.

A fortiori, on n'a pas le droit d'englober les pertes d'énergie du moteur dans le coefficient de traction. Qu'on mesure sur une ligne donnée et avec un matériel donné le nombre de watts-heures consommés par voiture-kilomètre ou par tonne-kilomètre, c'est parfait, et les mesures de ce genre présentent une grande utilité pratique ; mais il ne faut pas transformer ces chiffres en coefficient de traction, si l'on veut conserver à ce mot le sens rationnel et classique que nous avons rappelé plus haut et qu'on n'a pas le droit de changer arbitrairement.

Les pertes dans les engrenages et le moteur doivent bien entrer en ligne de compte, mais sous une autre forme, en les déduisant de l'énergie totale dépensée. On fait ce calcul très simplement en multipliant celle-ci par le *rendement* de l'appareil moteur, comprenant le moteur électrique et ses engrenages. Ce rendement, égal au quotient du travail moteur appliqué à l'essieu par l'énergie fournie au moteur, est déterminé, à toutes charges, pour chaque type de moteur, par les essais que nous avons exposés plus haut (p. 366), en supposant les moteurs en fonctionnement normal sans rhéostat[1].

Le rendement ainsi défini étant connu, rien n'est plus facile que de calculer l'énergie électrique nécessaire à la traction d'une automobile. Il suffira d'appliquer à l'essieu un effort moteur F

[1] On sait que les positions des régulateurs qui introduisent des résistances additionnelles ne doivent être employées que comme positions de passage ou de transition.

égal à l'effort résistant, c'est-à-dire, en appelant P le poids de l'automobile,

$$F = P\left(\rho + i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + Z.$$

Supposons toujours cet effort exprimé en kilogrammes et la vitesse V en mètres par seconde; la puissance à appliquer à l'essieu sera en kilogrammètres par seconde

$$FV = PV\left(\rho + i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + ZV, \tag{90}$$

et la puissance électrique correspondante à fournir aux bornes des moteurs sera en watts

$$\frac{9{,}81 \times FV}{\eta},$$

η étant le rendement du moteur en fraction de l'unité, à la vitesse considérée V, exprimée en mètres par seconde.

Nous reviendrons plus loin sur ce calcul avec plus de détails; nous le donnons ici seulement pour montrer la façon dont on doit faire figurer dans les raisonnements les frottements des engrenages et du moteur.

Résistance d'une automobile à la remorque. — La question doit être traitée tout différemment lorsqu'on étudie le mouvement d'une voiture automobile remorquée ou descendant une pente en vertu de son poids, ou bien encore lancée sur un palier par la force vive acquise, *sans qu'on envoie aucun courant dans le moteur.* Dans ce cas, tous les frottements s'ajoutent pour former la résistance passive opposée au mouvement, et l'effort de traction est celui qu'il faut exercer pour remorquer l'automobile avec moteur inerte, mais non enlevé, ce qui donne des chiffres beaucoup plus élevés. Par exemple, M. Hering a, dans les essais cités plus haut, trouvé, à conditions égales, un coefficient de 6,37 kg : t., au lieu de 4,37 kg : t. avec les engrenages enlevés; la différence représente les frottements des engrenages et de l'arbre du moteur. Il est facile de déterminer approximativement ces frottements en mesurant la puissance nécessaire pour faire tourner le moteur à vide avec ses engrenages; en la divisant par la vitesse correspon-

dante de la voiture, on obtient l'effort équivalent à la jante, que nous appellerons Ψ.

Cet effort ne dépend qu'indirectement du poids de la voiture, par suite du fait que les pertes du moteur sont à peu près proportionnelles à la puissance et celle-ci proportionnelle au poids à mouvoir. On peut donc se contenter d'écrire l'*équation du mouvement d'une automobile à moteur inerte* sous la forme

$$F = P\left(\rho + i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + Z + \Psi,$$

Ψ étant à déterminer d'après le type de moteur choisi. Lorsque celui-ci n'est pas fixé, on peut écrire comme première approximation, en posant $\Psi = \psi P$,

$$F = P\left(\rho + i + \psi + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right), \qquad (91)$$

et l'on prend alors pour ψ des valeurs déduites de mesures faites sur des matériels analogues. On peut admettre pour les automobiles électriques $\psi = 2$ à 6 kg. par tonne, ou mieux 2 à 3 kg. par tonne par moteur employé. Il est d'ailleurs préférable de mesurer pour chaque matériel, comme nous l'avons dit plus haut (p. 391), la résistance avec et sans engrenages par la méthode de la gravité.

Ces formules ne trouvent en pratique leur emploi que dans deux questions secondaires, l'arrêt des voitures et la récupération de l'énergie sur les pentes; partout ailleurs, d'après ce qui précède, ψ ne doit pas figurer. Il était donc nécessaire de distinguer, comme nous venons de le faire, les deux cas de fonctionnement des automobiles.

Valeurs pratiques de l'effort résistant total moyen sur les tramways à faibles déclivités. — Si l'on additionne les chiffres de résistances normales, on trouve, en admettant une résistance de l'air de 1 kg. par tonne, à la vitesse moyenne de 10 à 15 km : h., les chiffres suivants pour les voitures d'attelage:

Rails Vignole	3 à 5	kg. par tonne
— à gradin	5 à 7	—
— Marsillon	6 à 8	—
— Broca	8 à 10	—

Ces chiffres s'appliquent également aux automobiles, comme nous venons de l'expliquer, en y ajoutant 0,5 à 1,5 kg.

Ils sont d'ailleurs parfaitement confirmés par l'expérience. Par exemple, M. H. S. Hering a trouvé, dans ses expériences de Baltimore citées plus haut, un coefficient moyen de 4,37 kg : t. sur voie Vignole en alignement droit; de même, à Hanovre, M. Ross indique 4,8 kg : t. à la vitesse de 4,5 m : s.; MM. Curtiss et Pond ont relevé dans les mêmes conditions sur rails à gradin un coefficient moyen de 6,3 kg : t.

Quant aux résistances supplémentaires, elles peuvent être extrêmement variables, et, pour ce motif, il nous paraît impossible de les déterminer à l'avance ; elles doivent être calculées dans chaque cas d'après le plan et le profil en long, en suivant les indications données plus bas.

Il résulte cependant de la pratique que dans les villes à sol peu accidenté [1], avec des courbures modérées et un matériel à essieux rigides, la résistance due aux courbes atteint une valeur moyenne de 3 à 4 kg : t., supposée appliquée tout le long du parcours.

On arrive ainsi à des coefficients moyens pratiques que nous appellerons β, englobant toutes les résistances, sauf l'accélération (mécanisme non compris), et qui peuvent servir aux avant-projets sommaires :

Type de voie.	Valeur de β.
Vignole.	7 à 9 kg. par tonne
à gradin	8 à 10 —
Marsillon	10 à 12 —
Broca.	12 à 14 —

On appliquera le chiffre le plus faible aux voitures d'attelage, le plus fort aux automobiles et aux grandes voitures à impériale.

Ces chiffres sont en assez bon accord avec les résultats d'expérience suivants, malheureusement peu précis, qui montrent d'autre part l'énorme augmentation que peuvent produire les fortes courbures :

[1] On verra plus loin que, dans ce cas, les effets des pentes et des rampes se compensent sensiblement.

RÉSULTATS DE DIVERSES EXPÉRIENCES

en vue de la détermination de l'effort de traction global sur les tramways en palier avec matériel à essieux rigides.

AUTEUR ET LIEU DES EXPÉRIENCES	NATURE DE LA VOIE	VITESSE en kilomètres à l'heure.	COEFFICIENT β moyen trouvé.
Tresca. Tramway de Paris à Versailles.	Rails à ornière sur chaussée macadamisée	11 à 13	16
Francq.	Rails à ornière.	10	6 à 10
	—	»	moy. 10
Holt. Tramway électrique de Mödling.	Rails Vignole. Rayon de courbure minimum, 30 m. . .	15	9
	Rails à ornière.	15	12
Woods.	—	»	8
Perret. Tramways de Nottingham.	Rails à ornière. Alignement droit.	»	11,3
	Rails à ornière. Courbe de 14 m. .	»	16,3
	Rails à ornière. Courbe de 7 m. .	»	25
	Rails à ornière. Ornières engorgées	»	22,5
Wright.	Rails à gradin	»	7,5
H. S. Hering. Tramways de Baltimore.	Rails Vignole. Alignement droit	»	4.35
Tramway de Buffalo à Niagara Falls.	Rails à gradin. Alignement droit	»	6
Egger. Tramways de Gmunden.	Rails à ornière. Courbes moyennes	»	15
	Par temps de brouillard. . .		20
Tramways du Havre.	Rails à ornière.	»	15
Pirani. Tramway de Fontainebleau.	Rails Vignole.	»	8
Ross. Tramways de Hanovre.	—	12,5	4,8

M. Clarke admet en pratique 10 à 20 kg : t., moyenne 15 kg : t. Ce chiffre est recommandé aussi par Egger. M. de Marchena indique des chiffres peu différents des nôtres. M. Seguela estime que, sur des voies à ornières fréquemment nettoyées, la résistance moyenne est de 12,5 kg : t. et qu'elle peut être doublée si les ornières sont engorgées, ou au contraire réduite si elles sont parfaitement propres ; il admet une moyenne de 10 kg : t. sur rails à gradin et de 7,5 kg : t. sur rails Vignole en accotement. La Compagnie des Omnibus admet 12 kg : t. sur la voie Marsillon.

En appelant β_1 et β_2 les coefficients de traction en palier et en alignement droit applicables respectivement à une automobile de

poids P et aux voitures de poids Q remorquées par celle-ci, on aura, d'une façon générale,

$$F = \beta_1 P + \beta_2 Q + \frac{400 e}{R} (P + Q) \pm i (P + Q) + 0,08 (S_1 + S_2) V^2, \quad (92)$$

S_1 étant la surface de front et S_2 la surface fictive totale des voitures remorquées calculée comme il a été dit plus haut (p. 442).

On pourra comparer cette formule à celle qu'a donnée pour les automobiles électriques circulant sur voie Vignole, en alignement droit, M. L'Hoest, ingénieur des chemins de fer de l'État belge, à la suite des essais de cette administration : (93)

$$F = 1,8 P \pm Pi + 0,04 VP + 0,0415 V^2.$$

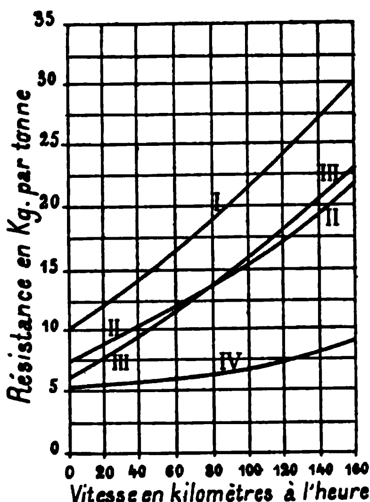


Fig. 801. — Courbes expérimentales d'effort de traction sur les chemins de fer en fonction de la vitesse.

I. Traction de la locomotive, du tender et du train d'après Clarke.
II. Traction du train seul d'après Clarke.
III. — — — du Bousquet.
IV. Traction de la locomotive, du tender et du train, d'après D. L. Barnes.

Valeurs pratiques de l'effort résistant total sur les chemins de fer. — Sur les chemins de fer, la vitesse influe d'une façon trop notable sur la résistance pour qu'on puisse donner des moyennes analogues aux précédentes. Il paraît préférable, par conséquent, de se servir de formules empiriques ou des courbes qui les représentent.

Les figures 799, 801 et 802 représentent quelques-unes des plus connues. On prendra seulement les chiffres fournis par celles de ces courbes qui s'appliquent au train remorqué, locomotive non comprise, et on ajoutera, d'après le tableau ci-dessus (p. 440), la résistance de l'air sur le véhicule de tête, qui n'est pas comptée dans la résistance du train.

Les essais de M. Desdouits, par exemple, donnent d'excellents renseignements jusqu'à 60 km : h.

Au delà, on possède également aujourd'hui des données précises sur la traction des trains grâce aux expériences de M. du Bousquet sur le chemin de fer

du Nord ; les grandes vitesses réalisées sur ce réseau en service courant et la limite très élevée admise par les règlements (120 km : h.) lui ont permis de faire des déterminations fort étendues.

La figure 802 résume, d'après M. Barbier[1], les résultats obtenus en 1891-95 avec le matériel ordinaire et le matériel à bogies en alignement droit et en palier pour des trains de 120 à 206 t. (moyenne 160 t. pour le matériel ordinaire et 200 t. pour le matériel à bogies). Ces courbes sont sensiblement paraboliques et peuvent s'exprimer par les équations suivantes :

Matériel ordinaire : $\mathfrak{R} = 1,6 + 0,46 \ V \left(\frac{V + 50}{1\,000}\right) = 1,6 + 0,023 \ V + 0,0046 \ V^2$;

Matériel à bogies : $\mathfrak{R} = 1,6 + 0,456 \ V \left(\frac{V + 10}{1\,000}\right) = 1,6 + 0,0045 \ V + 0,00456 \ V^2$.

Le tableau ci-après résume comparativement les valeurs obtenues :

VITESSE en kilomètres : heure.	RÉSISTANCE EN KG. PAR TONNE		DIFFÉRENCE
	Matériel ordinaire.	Matériel à bogies.	
Très faible.	1,6	1,6	0
60	4,64	3,52	1,12
70	5,46	4,15	1,29
80	6,38	4,88	1,48
90	7,40	5,70	1,68
100	8,50	6,62	1,86
110	9,70	7,62	2,05
115	10,33	8,16	2,14

Ces résultats confirment, comme on le voit, ceux de M. Desdouits : l'avantage du matériel à bogies, nul aux allures lentes, croît avec la vitesse et atteint environ 25 p. 100 (rapport 0,76 à 0,79) entre 60 et 115 km : h. ; le frottement des fusées est sensiblement le même qu'avec le matériel ordinaire et la principale cause de cette supériorité réside dans la diminution du nombre des intervalles ; le roulement est d'ailleurs plus doux.

En admettant que l'économie soit de 20 p. 100 seulement, on trouve que sur une rampe de 0,005 m., à la vitesse de 80 km : h., l'emploi des véhicules à bogies permettrait d'accroître le poids des express de 14 p. 100. On peut ainsi accepter l'augmentation de poids mort des voitures à couloir et offrir

[1] *Revue générale des chemins de fer*, avril 1897. Nous avons conservé à titre de document la troisième courbe

$$\mathfrak{R} = 1,45 + 0,0008 \ V^2,$$

qui résume les expériences de M. de Laboriette sur des trains de marchandises de la même Compagnie en 1882 ; le rapport $\frac{d}{D}$ des diamètres des fusées et des roues n'était dans ce cas que de 0,089, au lieu de 0105 à 0,115 pour les wagons à voyageurs.

aux voyageurs un plus grand confort sans accroître la puissance des locomotives.

Les trains électriques ne sauraient être constitués, croyons-nous, autrement qu'avec des wagons de ce genre. Il résulte, en outre, de ce qui précède, que pour leur donner la résistance minima, on devra les réunir, si possible, par des soufflets et les encadrer à l'avant et à l'arrière par des fourgons de même gabarit, munis d'avant-becs effilés ; la traction électrique rend la réalisation de cette dernière condition plus facile que la traction à vapeur.

Les formules de la C[ie] du Nord, qui se rapportent à un matériel très moderne, sont celles que nous adopterons ici. En admettant que le coefficient de frottement des automobiles soit traité à part, pour les motifs indiqués plus haut, et en ajoutant les autres termes de la résistance, nous aurons une formule générale applicable à la traction électrique sur les chemins de fer.

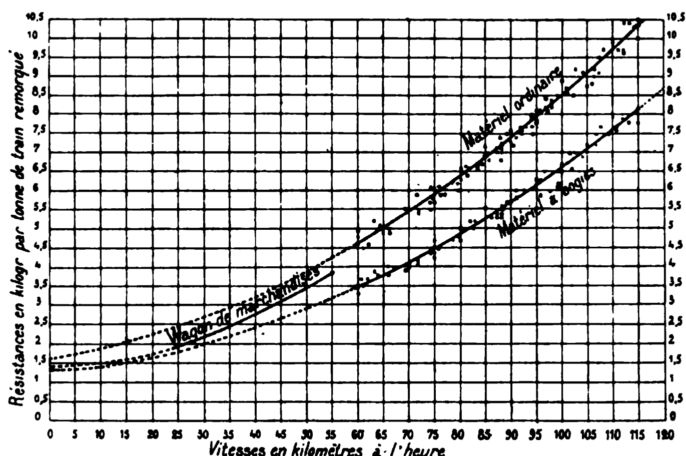


Fig. 802. — Résistance totale à la traction en kg. par tonne de voitures remorquées (non compris la résistance de la locomotive), d'après les expériences de M. du Bousquet sur le chemin de fer du Nord.

Soient P le poids des automobiles, Q celui des voitures remorquées, β le coefficient constant (1,5 à 2,5) de traction en palier et à faible vitesse applicable aux automobiles, S la surface du front ; on aura, sans compter l'accélération,

$$F = \beta P + 1{,}6\,Q + (P + Q)\,0{,}456\,V\,\frac{V + 10}{1000} + 0{,}9\,(P + Q)\,i + \frac{(P + Q)\,500\,e}{R} + \lambda S V^2. \qquad (94)$$

Si le matériel remorqué est du matériel ordinaire, il suffira de remplacer le troisième terme par les deux suivants :

$$P \times 0{,}456\,V\,\frac{V + 10}{1000} + Q \times 0{,}46\,V\,\frac{V + 50}{1000}.$$

Ces formules nous paraissent, grâce à leur solide base expérimentale, plus sûres que celles proposées antérieurement [1].

Pour les trains légers formés seulement de deux voitures, dont une motrice,

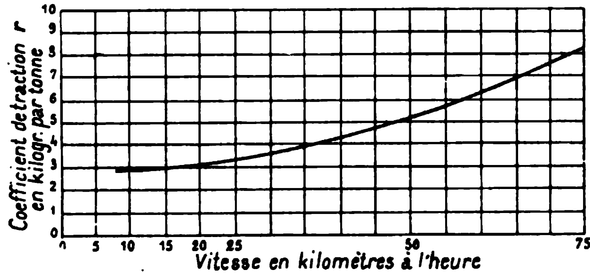


Fig. 803. — Courbe des coefficients de traction totaux d'un train électrique léger de 40 à 50 t., formé de 2 voitures à bogies.

on pourra employer également la courbe expérimentale de la figure 803, donnée par la C[ie] Walker.

Conditions de marche d'une voiture d'attelage ou d'une automobile sur une pente. — Il existe une pente qu'une voiture d'attelage une fois lancée peut descendre en vertu de son propre poids sans accélération. C'est celle pour laquelle le travail effectué par la pesanteur est juste égal au travail des frottements. En appelant i' cette pente, l'équation (90) donne en faisant F et $dV = o$,

$$i' = r + c + \frac{Z}{P} = \beta, \qquad (95)$$

β étant le coefficient de traction en palier et en alignement droit à la vitesse considérée, et, par suite, la résistance F peut se mettre

[1] On peut cependant indiquer aussi pour les chemins de fer la formule bien connue de Franck

$$F = f_1 P + f_2 Q \pm (P + Q)\, 0{,}9\, i + (P + Q) \frac{0{,}65}{R - 55} + \lambda\, (S_1 + S_2)\, V^2,$$

qui pourra s'appliquer à des trains électriques de marchandises ou mixtes.

D'après M. Franck, on doit faire dans cette formule $f_2 = 0{,}0025$ pour les voitures à voyageurs et 0,0029 pour les wagons, et $\lambda = 0{,}1225$, en supposant S_2 calculé comme il suit :

Fourgons à bagages	$S_2 = 1{,}7$ m²
Voitures à voyageurs, wagons couverts	0,5
Wagons découverts chargés.	0,4
— vides	1,0

On ajoute en outre 1 m² pour tout wagon fermé ou voiture à voyageurs suivant immédiatement un wagon découvert.

sous la forme plus simple

$$F = P\,(i - i)',$$

ou, s'il y a accélération,

$$F = P\left(i - i' + \frac{1}{g}\,\frac{dV}{dt}\right). \tag{96}$$

Cette pente suffit également à faire descendre une automobile lorsqu'on a supprimé les engrenages, mais non lorsqu'on laisse ceux-ci et le moteur tourner à vide ; les frottements du mécanisme donnent dans ce dernier cas à la pente limite une valeur plus grande

$$i'' = i + \beta + \psi.$$

A partir de la pente i', la résistance au roulement de la voiture est annulée et devient même négative ; par suite, pour les pentes comprises entre les deux valeurs i' et i'', l'automobile tend à descendre comme véhicule, mais elle est freinée par le mécanisme ; pour qu'elle descende effectivement, il faut fournir au moteur une certaine énergie sous forme de courant ; celle-ci est inférieure à l'énergie nécessaire pour la marche du mécanisme, car une partie de cette énergie est fournie par le travail de la pesanteur. Le courant nécessaire diminue ainsi quand la pente augmente et se réduit à zéro lorsqu'elle atteint la valeur i''.

Travail mécanique total nécessaire sur une ligne de tramway. — On peut, à l'aide des données précédentes, exprimer le travail total sur une ligne composée de sections de pente différente, les unes en courbe, les autres en alignement droit, etc. Appelons l, l', l'' les longueurs de ces sections successives et supposons d'abord une marche sans arrêt et des déclivités positives (rampes) ou négatives (pentes) ne dépassant pas la limite i' ; le travail total, pour une automobile de poids P et un train remorqué de poids Q, sera

$$(P + Q)\,\Sigma\, l\left(r + c + i + \frac{Z}{P + Q}\right) = (P + Q)\,\Sigma\, l(i + i'), \tag{97}$$

les accélérations positives et négatives se compensant le long du chemin parce qu'il n'y a pas de freinage.

Cette expression peut s'écrire aussi, en appelant h la différence de niveau entre les points extrêmes,

$$(P + Q)\,h + \Sigma li'.$$

C'est la somme du travail de roulement et du travail nécessaire pour élever le poids P + Q de la hauteur h.

Si l'on considère le trajet de retour sur la même ligne, on trouvera de même

$$(P + Q)\,\Sigma l\,(i' - i) = (P + Q)\,(\Sigma li' - h).$$

Le travail totalisé pour l'aller et retour donne donc simplement

$$T = (P + Q)\,\Sigma li',$$

et l'influence des pentes disparaît par compensation.

Lorsque certaines pentes dépassent la limite i', la compensation n'existe plus, parce qu'on est obligé de freiner les voitures à la descente. Ce freinage est obtenu d'abord par le frottement des engrenages et du moteur, puis par des freins proprement dits. On perd de cette manière tout le travail négatif $(P + Q)\,\Sigma l\,(i' - i)$ correspondant à ces pentes. On peut donc écrire, en désignant par $\Sigma_{i>i'}$ cette somme spéciale,

$$T = (P + Q)\,[\Sigma li' + \Sigma_{i>i'}\,(i - i')]. \tag{98}$$

Le travail consommé pour acquérir la force vive $\frac{1}{2}\frac{P+Q}{g}V^2$ aux démarrages peut être compensé par le travail fourni aux arrêts par cette force vive, à condition qu'on ne se serve pas des freins pour arrêter. Sinon, il faut en tenir compte et écrire, en appelant n le nombre de ces démarrages,

$$T = (P + Q)\left[\Sigma li' + \Sigma_{i>i'} l\,(i - i') + \frac{nV^2}{2g}\right]. \tag{99}$$

L'expression $\Sigma li'$ contient tous les travaux dus au roulement, aux courbes et à l'action du vent, et les deux derniers termes, les travaux consommés par les freins.

Calcul de la puissance à la jante nécessaire. — Connaissant l'effort total en kilogrammes et la vitesse en kilomètres à l'heure

sur une partie quelconque du parcours, on a immédiatement la puissance mécanique correspondante par l'expression

$$\frac{FV}{3,6} \times \frac{9,81}{1000} \text{ en kilowatts} \qquad (100)$$

ou

$$\frac{FV}{3,6 \times 75} \text{ en chevaux,} \qquad (101)$$

$\frac{V}{3,6}$ étant la vitesse en mètres par seconde.

Pour faciliter les calculs, nous avons dressé le tableau ci-dessous, qui donne en chevaux la puissance nécessaire pour remorquer à différentes vitesses une tonne de train présentant des résistances totales connues (pentes ou rampes comprises).

RÉSISTANCE totale en kg : t.	VITESSE EN KILOMÈTRES A L'HEURE							
	5	10	15	20	25	30	35	40
	VITESSE EN MÈTRES PAR SECONDE							
	1,388	**2,777**	**4,166**	**5,555**	**6,944**	**8,333**	**9,722**	**11,111**
2,5	0,046	0,093	0,139	0,185	0,231	0,278	0,324	0,370
5,0	0,093	0,185	0,277	0,370	0,463	0,555	0,648	0,741
7,5	0,139	0,277	0,416	0,555	0,694	0,833	0,972	1,111
10,0	0,185	0,370	0,555	0,741	0,926	1,111	1,296	1,481
12,5	0,232	0,463	0,694	0,926	1,157	1,388	1,620	1,852
15	0,278	0,555	0,833	1,111	1,388	1,666	1,944	2,222
20	0,370	0,741	1,111	1,481	1,852	2,222	2,593	2,963
25	0,463	0,926	1,388	1,852	2,315	2,777	3,241	3,704
30	0,555	1,111	1,666	2,222	2,777	3,333	3,888	4,444
40	0,741	1,481	2,222	2,963	3,704	4,444	5,185	5,926
50	0,926	1,852	2,777	3,704	4,630	5,555	6,482	7,407
60	1,111	2,222	3,333	4.444	5,555	6,666	7,777	8,888
70	1,296	2,592	3,888	5,185	6,481	7,777	9,073	10,369
80	1,481	2,963	4,444	5,926	7,408	8,888	10,370	11,852
90	1,666	3,333	5,000	6,666	8,333	10,000	11,666	13,333
100	1,852	3,704	5,555	7,407	9,260	11,111	12,963	14,814

La figure 804 donne sous forme graphique ces puissances rapportées à deux échelles, l'une en kilowatts, l'autre en chevaux.

Coefficient de traction applicable dans les mines. — Dans les mines, par suite de la pose défectueuse des voies et de la présence constante d'humidité ou de poussière qui rend les rails glissants et

exige l'emploi des boîtes à sable, le coefficient de traction peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées que sur les voies à l'air libre. C'est ainsi qu'aux mines de Marles, M. Baily[1] n'a pas trouvé moins de 55 kg. par tonne transportée, en y comprenant le poids mort et le poids utile. On a heureusement obtenu des résultats plus avantageux dans différentes mines belges, notam-

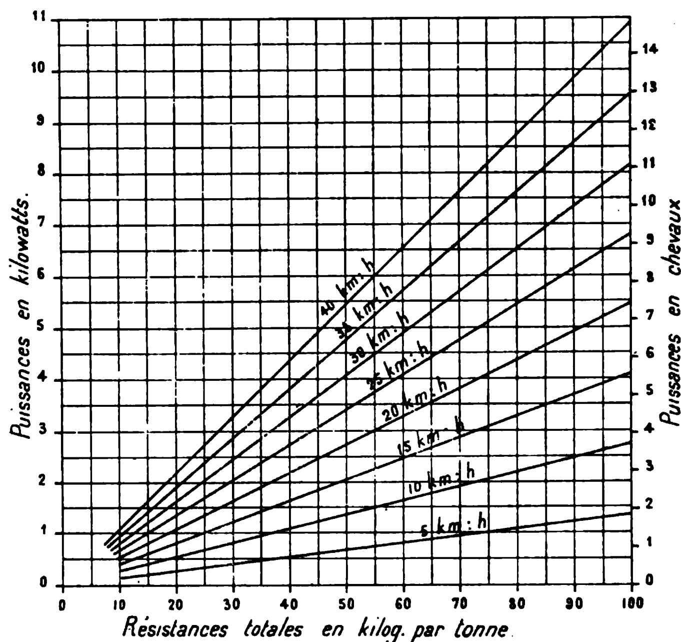


Fig. 804. — Puissances nécessaires à la jante pour remorquer 1 tonne pour diverses valeurs de la résistance totale.

ment au charbonnage d'Amercœur et à celui de Fondpiquette, dans le bassin de Liège : dans les deux cas, les rails sont du type Vignole, en acier, et pèsent 12 kg. par mètre courant; les voies ont respectivement 0,50 et 0,60 m. de largeur et présentent des pentes de 2,7 et 2 mm. par mètre ; le coefficient de traction a été trouvé égal à 8 kg : t. à Amercœur et à 5,25 kg : t. seulement à Fondpiquette, où le matériel roulant est plus perfectionné.

D'autre part, dans la mine allemande de Hohenzollern, la résistance atteint 12 à 15 kg. par tonne de train ; elle est de 15 kg. à la mine de Laurahütte.

[1] *Loc. cit.* (t. I, p. 511).

Ce sont ces derniers chiffres qui nous paraissent pouvoir être adoptés comme moyennes dans la pratique ordinaire.

Coefficient de traction applicable sur crémaillère. — Deux cas sont à distinguer dans la traction sur crémaillère, suivant que les automobiles sont à un seul ou à deux mécanismes (voir p. 35). Le premier cas ne diffère pas de celui d'une automobile ordinaire ; mais, par suite de la présence d'un faux essieu, avec ou sans bielles d'accouplement, et d'engrenages à double réduction, le rendement du moteur et du mécanisme réunis est plus faible d'environ 10 à 15 p. 100 que dans le matériel à adhérence ; de même, le coefficient ψ de frottement du mécanisme aux descentes (p. 454) est augmenté et peut s'élever à 5 à 6 kg. par tonne.

Le cas de deux mécanismes se ramène à celui d'un seul, si l'on peut les débrayer tour à tour ; sinon, pendant que l'un d'eux travaille, l'autre tourne à vide et augmente ainsi de 2 à 5 kg. par tonne le coefficient de traction, soit en adhérence, soit en crémaillère ; aux descentes, le coefficient ψ, comprenant le frottement de deux mécanismes, est au moins doublé. Quand on veut faire de la récupération aux descentes, il est donc très utile de pouvoir débrayer les mécanismes à volonté. Il en est de même sur les lignes à traction mixte pour réduire le coefficient en adhérence.

Lorsqu'un seul mécanisme actionne à la fois les roues porteuses et la roue dentée, il faut tenir compte du glissement des roues porteuses, qui peut augmenter le coefficient de traction d'environ 5 à 10 p. 100. Dans le cas d'un seul mécanisme à double effet, qui est, comme on l'a vu, le plus pratique, on peut admettre pour le coefficient de traction les mêmes valeurs que celles indiquées par l'expérience dans la traction à vapeur sur crémaillère et les majorer seulement de 1 à 2 kg. par tonne pour tenir compte du frottement supplémentaire des coussinets de guidage.

On trouve ainsi, sur rails Vignole :

Pour les automobiles,	12 kg.	par tonne de poids de la voiture ;
— voitures d'attelage,	3 kg.	— — — .

Sur d'autres types de rails, ces chiffres seraient majorés de la même quantité que pour les tramways ordinaires.

Jusqu'ici, nous n'avons pas parlé du frottement de la roue dentée sur la crémaillère dans les parties où celle-ci est utilisée. D'après l'expérience[1], ce frottement peut être évalué à environ 20 kg. par tonne de poids total du train. L'effort dû à la gravité doit être aussi, bien entendu, calculé d'après ce poids total.

Dans les véhicules à deux mécanismes des types décrits plus haut (p. 43), il y a naturellement deux efforts de traction maxima à calculer, l'un pour le mécanisme à adhérence, l'autre pour le mécanisme à roue dentée ; ce dernier doit être suffisant dans tous les cas pour remorquer le train à lui seul sans le concours du mécanisme à adhérence, qui peut être beaucoup moins puissant.

Enfin, nous pouvons mentionner que l'effort de traction ordinaire des machines à crémaillère à vapeur est de 4 à 5000 kg. au crochet; celles du Harz développent même 12600 kg. On peut a fortiori atteindre les mêmes chiffres avec des moteurs électriques.

§ 2. — Traction

Connaissant la résistance à vaincre, il nous reste à voir comment on peut, à l'aide de moteurs électriques, développer l'effort moteur nécessaire, et à étudier les circonstances particulières qui peuvent se présenter dans la traction électrique.

La traction comporte, à proprement parler, l'étude des moteurs en mouvement; mais nous avons déjà étudié avec détails dans les chapitres IX et X les conditions de fonctionnement et de régulation de vitesse des divers types, et nous rappelons ci-dessous les principaux résultats de cette étude. Il ne nous reste donc ici qu'à en tirer quelques conclusions pratiques au point de vue du choix des moteurs pour un service donné, à examiner le rôle de l'adhérence et du poids mort dans l'utilisation de l'effort moteur, et la question du démarrage et de l'accélération, qui joue un rôle important dans tous les systèmes de traction et plus particulièrement dans la traction électrique, enfin à donner quelques exemples caractéristiques d'application de ces principes aux divers cas de la pratique.

[1] Cf. Lévy-Lambert, *Chemins de fer à crémaillère.*

I. — Utilisation des moteurs électriques

L'une des erreurs qu'on a le plus fréquemment commises dans la traction électrique, surtout au début, a été l'emploi de moteurs mal proportionnés au travail qu'on leur demandait, faute de s'être fait une idée exacte de ce qui constitue, si l'on veut bien admettre cette expression, la *capacité de service* d'un moteur de traction. Aussi doit-on regretter que de nombreux ingénieurs et constructeurs aient conservé la mauvaise habitude de désigner les moteurs électriques par leur puissance maxima en chevaux ; le plus souvent, en effet, comme nous l'avons signalé déjà au chapitre V (p. 187), la puissance en chevaux, si l'on ne spécifie pas la vitesse correspondante, est sans relation directe avec le service à fournir[1], et un moteur de 25 chev., calculé pour une exploitation américaine où la vitesse varie de 16 à 25 km : h. et même davantage, est incapable de fournir avec les mêmes engrenages et la même densité de courant cette puissance sur un réseau de tramways européen où la vitesse varie entre 12 et 20 km : h.

Un moteur de tramway ne peut être défini par une seule constante, mais bien par deux, qui sont soit la puissance et la vitesse, soit l'effort et la vitesse ; comme la puissance est elle-même le produit de ces deux dernières quantités, ce sont elles qu'il est rationnel de prendre comme caractéristiques d'un appareil de traction.

Une semblable définition ne donne cependant encore que des renseignements incomplets, car elle n'indique pas l'effort maximum réalisable au démarrage sans détérioration du moteur. En outre, il est nécessaire de connaître non pas une seule valeur du couple et de la vitesse, mais toute une série de valeurs correspondant aux divers efforts de traction qu'on aura à fournir sur les différentes pentes ou rampes de la ligne. Si le moteur est excité en dérivation, la connaissance de la vitesse normale est, il est vrai, suffisante, puisqu'elle reste sensiblement la même à toutes charges. Mais il en est tout autrement, comme on l'a vu, pour les moteurs en série

[1] Il n'y a d'exception, comme on l'a vu, que sur les chemins de fer à grande vitesse où l'on emploie des engrenages.

(excepté dans le cas où on les shunte par une batterie suivant la méthode de la page 107). Pour ces derniers, la vitesse varie très notablement avec l'effort nécessaire et ne sera pas la même en rampe qu'en palier; ils ne sont donc suffisamment définis que par la courbe des vitesses en fonction des efforts, ou, ce qui est préférable, par les courbes de vitesse et d'effort en fonction du courant, dont nous avons fait un constant usage dans les chapitres IX et X.

C'est seulement lorsqu'on possède ces courbes ou tout au moins, comme nous allons l'expliquer, la courbe des vitesses et les valeurs maxima du courant, qu'on peut se faire une idée de ce dont un moteur est capable avec une réduction donnée.

Détermination du courant et de la vitesse que prendra une voiture équipée avec des moteurs en série aux divers points d'un parcours. — Cette détermination peut se faire avec plus ou moins d'exactitude suivant qu'on possède des courbes caractéristiques complètes ou non. Nous supposerons celles-ci relevées sur les moteurs munis de leurs engrenages, de façon à donner l'effort de traction *net* sur l'essieu.

1° *Calcul exact.* — Supposons d'abord qu'on possède les courbes d'effort et de vitesse en fonction du courant consommé par le moteur. Il suffit de calculer la résistance à la jante des roues en chaque point du parcours d'après le profil et le tracé. L'effort moteur devant être égal à cette résistance, on lit aussitôt la courbe des efforts, puis on recherche l'intensité correspondante sur la courbe des vitesses et la valeur de la vitesse correspondant à ce courant.

Soit, par exemple, une voiture de 8 t. remorquée par deux moteurs G.E. 800 à faible vitesse sur des rampes de 0,020 avec un coefficient de traction de 10 kg. par tonne (y compris le frottement des coussinets de guidage). L'effort moteur nécessaire est

$$8\,000\,(0{,}010 + 0{,}020) = 240 \text{ kg.},$$

ce qui fait 120 kg. par moteur.

Les courbes de la figure 805 donnent directement les courant

et vitesse correspondants, par exemple, pour le moteur lent :

25 ampères et 20 km. à l'heure sans shunt (plein champ),
31 — et 23,5 — — avec shunt (champ réduit).

Comme on l'a vu (p. 74), on peut transformer les courbes en leur donnant pour coordonnées communes les vitesses au lieu des

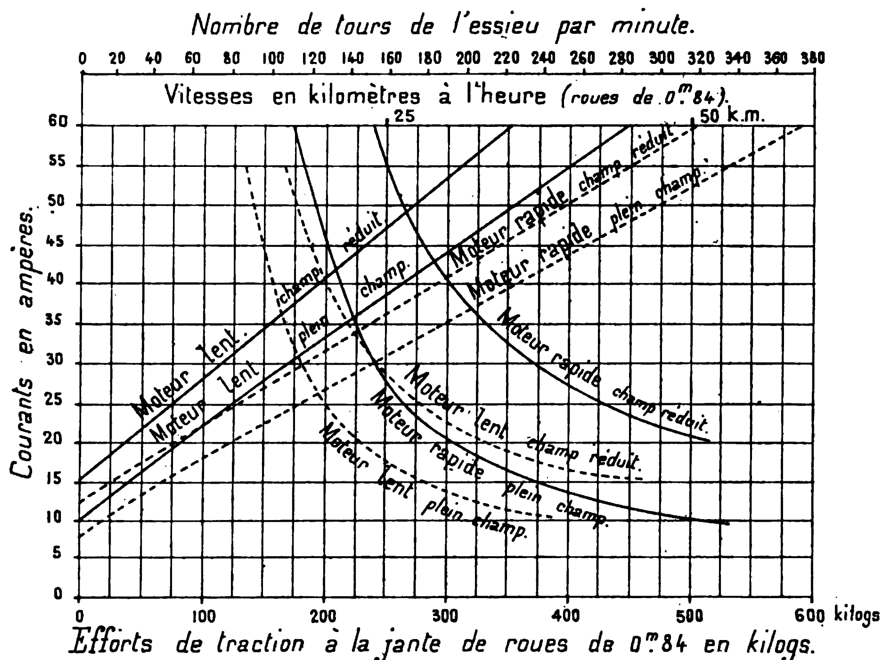


Fig. 805. — Courbes caractéristiques du moteur G. E. 800 à 3 ou 4 spires par encoche.
Courbes ascendantes : efforts de traction. — Courbes descendantes : vitesses.

intensités de courant : la relation est alors établie directement entre l'effort résistant et la vitesse ; mais il est généralement préférable de conserver le courant comme variable pour faciliter le calcul de l'énergie (voir § 4).

Rien n'est plus facile, du reste, lorsqu'on possède les courbes de vitesse en fonction du courant, que de juxtaposer à l'échelle des courants une seconde graduation indiquant les rampes correspondantes dans le cas d'un matériel et d'un équipement donné, ce qui permet ensuite de supprimer la courbe des efforts.

D'autres ingénieurs préfèrent joindre à l'épure complète une courbe représentant les vitesses en fonction des rampes, comme

le montre par exemple la courbe IV de la figure 806, dressée par la Compagnie Walker pour une voiture de tramway de 7,7 t. à vide, munie d'un moteur de 25 chev.

Dans ce qui précède, nous avons supposé le coefficient de traction total β constant à toute vitesse. Mais il sera plus exact, sur-

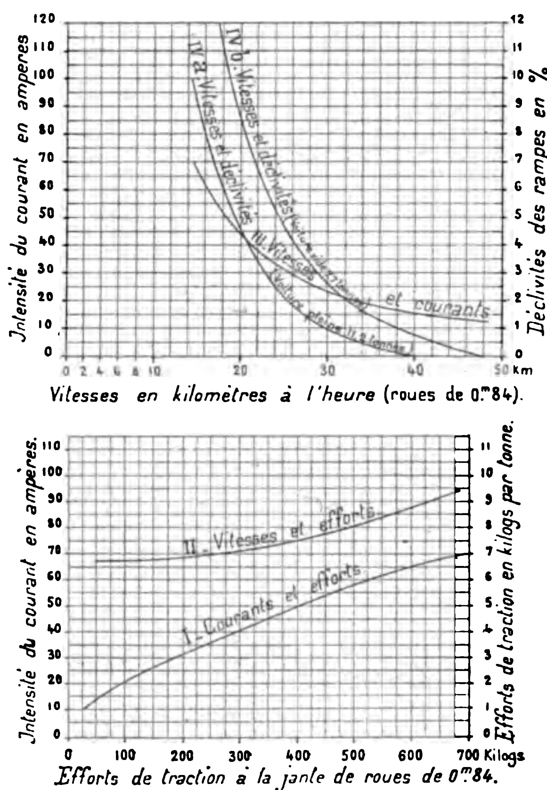


Fig. 806. — Courbes caractéristiques d'une voiture de tramway équipée avec un moteur Walker de 25 chev.

tout pour les chemins de fer, de tenir compte de sa variation. A cet effet, on tracera sur une même épure, d'une part, les courbes des efforts moteurs en fonction de la vitesse pour les différentes positions du régulateur et, d'autre part, la courbe des efforts résistants ; les points d'intersection de cette dernière avec les précédentes détermineront les vitesses de régime.

La figure 807 donne un exemple de ce genre d'épure. Il s'applique à un train formé de deux voitures à bogies munies de 4 moteurs, le tout pesant

50 t. Les courbes du haut et du bas représentent les efforts en fonction de la vitesse d'après des données fournies par le constructeur (C[ies] Baldwin-Westinghouse) pour les trois groupements types des 4 moteurs et les courbes que nous en avons déduites, d'après la méthode de la page 155, pour les régimes intermédiaires obtenus en ajoutant certaines résistances en série. Les numéros des courbes indiquent les positions correspondantes du régulateur.

Supposons que le train gravisse une rampe de 5 mm : m. en alignement

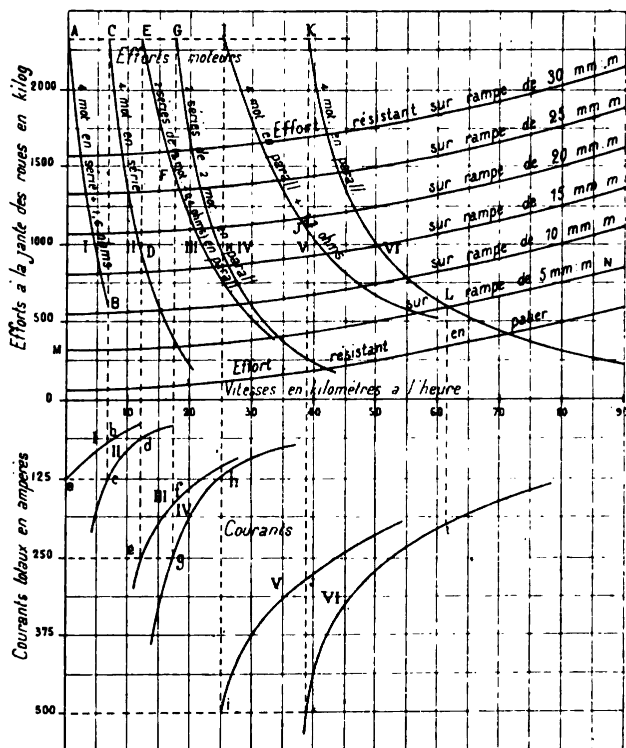


Fig. 807. — Épure donnant les vitesses d'un train sur des rampes variées et pour les diverses positions I, II, III, IV, V, VI du régulateur. — Train de 50 t. mû par 4 moteurs de 50 chev. avec régulation série-parallèle.

droit et qu'on veuille connaître les vitesses en régime permanent obtenues dans ces différentes positions. Nous commençons par dresser le tableau des efforts de traction totaux ci-après d'après la formule de la page 431 et nous les représentons par une courbe MLN. Celle-ci coupe la courbe VI au point L ayant pour abscisse 62 ; on en déduit que la vitesse en régime permanent, sur la 6e touche du régulateur, sera de 62 km : h. sur une rampe de 5 mm : m. On lit de même les vitesses sur les autres touches. En construisant une série de courbes parallèles à MLN et correspondant à d'autres rampes, on aura donc un tableau complet donnant par simple lecture la vitesse du train pour toutes les positions du régulateur et pour toutes les déclivités. Si l'on porte au-dessous

RÉSISTANCE TOTALE D'UN TRAIN DE 50 T. FORMÉ DE DEUX VOITURES A BOGIES SUR DIVERSES RAMPES EN ALIGNEMENT DROIT ET A DIFFÉRENTES VITESSES

VITESSE V du train en km : h.	COEFFICIENT de traction d'après les expériences de la Compagnie du Nord en kg : t.	RÉSISTANCE correspondante appliquée au poids total du train.	RÉSISTANCE supplémentaire sur la surface de front du train. $Z = 0,08 \times 6,5 \times \left(\frac{V}{3,6}\right)^2$	RÉSISTANCE totale du train en palier et en alignement droit.	RÉSISTANCE TOTALE SUR RAMPE DE					
					0,005 + 250 kg.	0,010 + 500 kg.	0,025 + 750 kg.	0,020 + 1 000 kg.	0,025 + 1 250 kg.	0,030 + 1 500 kg.
1	2	3	4	5						
5	1,4	70	1	71	321	571	821	1 071	1 321	1 571
10	1,4	70	4,02	74,02	324,02	574,02	824,02	1 074,02	1 324,02	1 574,02
15	1,5	75	9,025	84,03	334,03	584,03	834,03	1 084,03	1 334,03	1 584,03
20	1,6	80	16,07	96,07	346,07	596,07	846,07	1 096,07	1 346,07	1 596,07
25	1,8	90	25,12	115,12	365,12	615,12	865,12	1 115,12	1 365,12	1 615,12
30	2	100	36,08	136,08	386,08	636,08	886,08	1 136,08	1 386,08	1 636,08
35	2,2	110	49,15	159.15	409,15	659.15	909,15	1 159,15	1 409,15	1 659,15
40	2,4	120	64,20	184,20	434,20	684 20	934,20	1 184,20	1 434,20	1 684,20
45	2.6	130	81,25	213,25	463,25	713,2	963,25	1 213,25	1 463,25	1 713,25
50	2,9	145	100,2	245,2	495.2	745,2	995,2	1 245,2	1 495,2	1 745,2
55	3,2	160	121,2	281,2	531,2	781,2	1 031,2	1 281,2	1 531,2	1 781,2
60	3,5	175	144,3	319,3	569.3	819,3	1 069,3	1 319,3	1 569,3	1 819.3
65	3,8	190	169,4	359,4	609,4	859,4	1 109,4	1 359,4	1 609,4	1 859,4
70	4.1	205	196,5	401,5	651.5	901,5	1 151,5	1 401,5	1 651,5	1 901,5
75	4,5	225	225,6	450.6	700,6	950,6	1 200,6	1 450,6	1 700,6	1 950,6
80	4,9	245	256,7	501,7	751,7	1 001,7	1 251,7	1 501,7	1 751,7	2 001,7
85	5,3	265	289,8	554,8	804,8	1 054,8	1 304,8	1 554,8	1 804,8	2 054,8
90	5,7	285	325	610	860	1 110	1 360	1 610	1 860,	2 110
95	6,1	305	361,9	666,9	916.9	1 166.9	1 416,9	1 666,9	1 916,9	2 166,9
100	6,6	330	400,7	730,7	980,7	1 230,7	1 480,7	1 730,7	1 980,7	2 230,7

de l'axe des abscisses, pour éviter la confusion, les intensités de courant rapportées aux mêmes vitesses et aux mêmes positions du régulateur, on peut lire en même temps la valeur du courant correspondant.

2° *Calcul approximatif.* — Supposons maintenant qu'on possède seulement la caractéristique de la vitesse des moteurs d'une voiture ou d'un train en fonction du courant (fig. 808). On peut alors se faire une idée grossièrement approchée des vitesses et des courants sur les différentes rampes à l'aide de la méthode suivante, bien connue des ingénieurs de tramways électriques.

Appelons F l'effort résistant en kg., V la vitesse en km : h. ou $\frac{V}{3,6}$ la vitesse en mètres par seconde, UI la puissance en watts, g l'accélération de la pesanteur. On suppose d'abord que le rendement du moteur est constant à tous les régimes (ce qui est inexact) et égal à une valeur moyenne η_m, qu'on peut prendre égale à 0,72 en pratique, d'après les résultats expérimentaux cités plus loin. On a, en égalant les travaux moteur et résistant,

$$\frac{FV}{3,6} = \eta_m \frac{UI}{g},$$

d'où, en appelant β le coefficient de traction total du train en question moins le travail de la pesanteur et i l'inclinaison de la rampe considérée,

$$I = \frac{g\,VP\,(\beta + i)}{3,6\,U\eta_m}, \qquad (102)$$

P étant le poids total du train. Le tableau de la page 463 donnant les valeurs de $\frac{V\,(\beta + i)}{3,6 \times 75}$ peut aider à ces calculs.

Si l'on adopte le chiffre ordinaire U = 500 volts et qu'on exprime P en tonnes et β et i en kilogrammes par tonne, cette formule se réduit à

$$I^{amp.} = 0,00545\,\frac{V^{km\,:\,h.}\,P^{tonnes}\,(\beta + i)^{kg\,:\,t.}}{\eta_m}. \qquad (103)$$

Quand on n'a pas la courbe de rendement, on peut supposer que η a les valeurs suivantes (engrenages compris) :

η = 0,65 à 1/4 de charge,
= 0,70 à 1/2 de charge,
= 0,75 à 0,80 à pleine charge.

Cette formule est celle qu'on emploie ordinairement, faute de courbes, pour déterminer approximativement le courant absorbé aux divers points d'un parcours lorsqu'on se donne la vitesse ; mais les résultats ainsi obtenus sont peu exacts (voir § 4).

Réciproquement, si l'on a la courbe de vitesse, la même formule peut, comme l'a montré M. Fischer Hinnen[1], donner une valeur approchée de la vitesse. Si on la met, en effet, sous la forme

$$\frac{I}{V} = 0{,}00545 \left(\frac{\beta + i}{\eta_m}\right) P, \qquad (104)$$

cette équation est celle d'une droite menée par l'origine et dont le coefficient angulaire dépend du rapport $\frac{\beta + i}{\eta_m}$; le point où elle coupe la caractéristique détermine le courant et la vitesse sur la rampe donnée i.

Ce procédé est très simple, mais l'erreur qu'on commet sur η_m peut fausser notablement les résultats. Pour améliorer ceux-ci, on peut faire une seconde approximation, lorsqu'on connaît un peu la loi de variation du rendement, de la manière suivante : pour chaque point déterminé ainsi sur la courbe, on prendra la valeur η_i correspondant au courant obtenu et on en tirera par la même formule une nouvelle valeur de I.

Exemple numérique. — Pour éclaircir cette méthode, nous reproduisons ci-dessous un exemple donné par M. Fischer Hinnen, en suivant son mode d'exposition.

Soient à étudier l'intensité de courant et la vitesse prises par une voiture à 32 places circulant sur des rampes de 0,050 au maximum, avec un coefficient de traction de 10 kg. par tonne.

Le poids total de la voiture, en estimant provisoirement le poids des appareils électriques, se compose des éléments suivants :

Poids de la voiture seule.	2,80 t.
— des moteurs.	1,40 —
— des voyageurs	2,24 —
Total. .	6,44 t.

L'effort de traction maximum est

$$(10 + 50)\ 6{,}44 = 386 \text{ kg.}$$

Il faudra vérifier que le moteur pouvant développer ce couple présente bien

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1894, et *Éclairage Électrique*, septembre 1894.

le poids admis ci-dessus ; sinon, le calcul serait à refaire jusqu'à ce qu'il y ait concordance.

Supposons que le poids estimé soit exact et que le moteur ait pour caractéristique de vitesse la courbe de la figure 808 ; soient 500 volts la tension moyenne du réseau et 0,82 le rendement indiqué pour le moteur. Si ce dernier était constant et que la vitesse restât la même (195 m. par minute) sur toutes les rampes, on aurait, d'après la formule précédente :

Pour $i =$	0,	le courant I =	5	ampères
—	0,010	—	10	—
—	0,020	—	15	—
—	0,030	—	20	—
—	0,040	—	25	—
—	0,050	—	30	—

Pour tirer de ce tableau les vitesses réelles et les intensités de courant correspondantes, on marquera sur la figure les points ayant pour abscisse I et pour ordonnée commune 195. Les coordonnées des points d'intersection des droites menées de l'origine par ces points avec la caractéristique donneront les valeurs de première approximation.

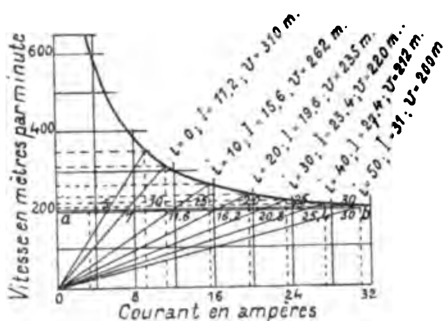


Fig. 808. — Exemple d'application de la méthode de M. Fischer-Hinnen pour la détermination des vitesses sur diverses rampes.

La seconde s'obtiendra par des corrections plus ou moins précises. Par exemple, si nous admettons pour la marche en palier un rendement de 0,585 seulement, on aura pour $i = 0$

$$I = 5 \frac{82}{58,5} = 7 \text{ ampères},$$

soit 2 ampères de plus que plus haut. Au contraire, pour $i = 0,050$, la différence est nulle. M. Fischer Hinnen admet alors que les autres corrections varient linéairement et que pour chaque différence de pente de 0,010 il faut ajouter aux chiffres précédents

$$\frac{2 \times 10}{50} = 0,4 \text{ ampère}.$$

Le tableau devient ainsi :

Pour $i =$	0,050,	le courant I	= 30	ampères.
—	0,040		25 + 0,4 = 25,4	—
—	0,030		20 + 0,8 = 20,8	—
—	0,020		15 + 1,2 = 16,2	—
—	0,010		10 + 1,6 = 11,6	—
—	0		5 + 2 = 7	—

et ce sont les droites ainsi déterminées dont on prend les intersections avec la courbe. Les chiffres inscrits le long de celle-ci indiquent les résultats obtenus.

Méthode plus parfaite. — La méthode précédente renferme un côté assez arbitraire. On peut la perfectionner en admettant d'après la formule 35 (p. 87) que le couple moteur varie suivant la loi linéaire approximative

$$C = A\,(I - j_0),$$

j_0 étant le courant de pertes supposé constant pour simplifier, et A une constante, ce qui revient à dire que le courant utilisé est $(I - j_0)$. L'équa-

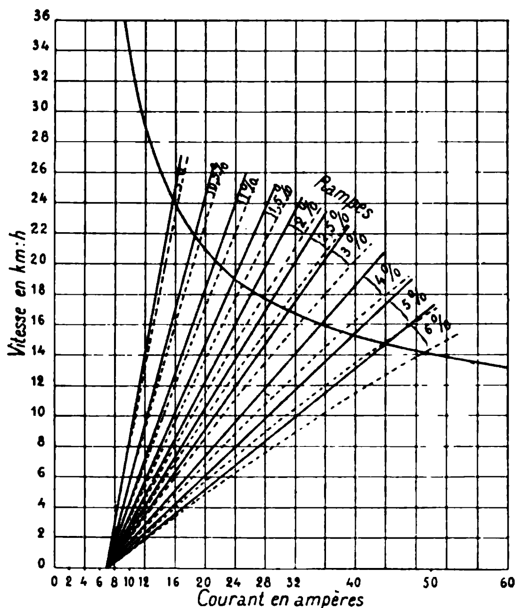


Fig. 809. — Détermination des vitesses et des courants pris par une voiture sur diverses rampes, d'après une seule caractéristique. — Méthode perfectionnée.

tion (104) de M. Fischer-Hinnen doit alors être remplacée par la suivante plus approchée :

$$\frac{I - j_0}{V} = \frac{gP\,(\beta + i)}{3{,}6\;U} = 0{,}00545\;(\beta + i)\;P. \qquad (105)$$

En donnant à i diverses valeurs, on obtient un faisceau de droites issu non plus de l'origine, mais d'un point de l'axe des abscisses ayant pour abscisse j_0.

Mais, en opérant ainsi, on ne tient pas compte du léger ralentissement produit par la perte par effet Joule dans l'inducteur et l'induit, qui abaisse la vitesse correspondant à chaque courant I dans le rapport

$$\frac{U - rI}{U}.$$

Il faut donc multiplier les ordonnées des différentes droites par ce rapport, variable avec l'abscisse, pour obtenir les lignes (paraboles) dont les intersections avec la courbe de vitesse indiquent les régimes sur les diverses pentes.

La figure 809 donne un exemple de courbes ainsi obtenues pour le moteur en série défini par les courbes de la page 88 et dont le courant de pertes est de 7 ampères, appliqué à une automobile de 6,5 t. ayant un coefficient de traction de 10 kg. par tonne et circulant sur des rampes de 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 5 et 6 p. 100 ; les tracés pleins représentent la première approximation et les tracés pointillés la seconde.

L'hypothèse de la loi linéaire, que nous avons faite ci-dessus, n'est exacte empiriquement qu'à partir d'une certaine charge ; elle conduit donc à des résultats seulement approximatifs sur les faibles rampes.

Ces méthodes approximatives, qui exigent une seule courbe, peuvent suffire ; mais tout compte fait, quand on considère le temps perdu par la seconde approximation, on voit qu'elles sont, en réalité, plus compliquées en même temps que moins exactes que la première. Les ingénieurs devront donc toujours demander aux constructeurs de moteurs les deux caractéristiques indiquées plus haut et, autant que possible, *relevées sur une voiture équipée.*

Modification de la vitesse par changement des roues, des engrenages ou de l'enroulement induit. — Si, partant d'un type donné

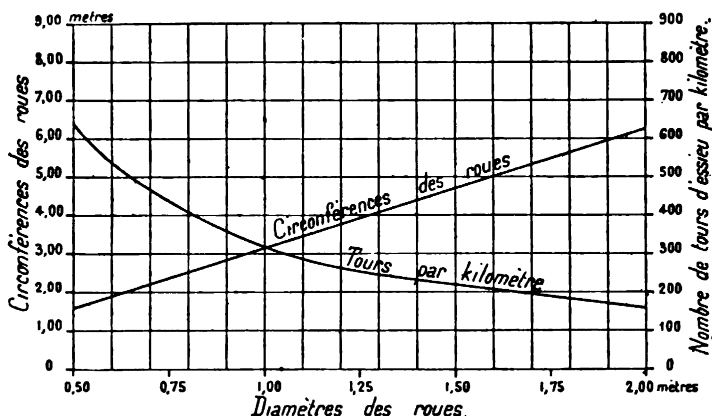


Fig. 810. — Relations graphiques entre le diamètre des roues, leur circonférence et leur vitesse.

de matériel roulant, on change le diamètre des roues, on modifie les vitesses dans le même rapport que ce diamètre. La figure 810, qui représente graphiquement les valeurs de la circonférence et de la vitesse en fonction du diamètre des roues et de leur nombre de tours, facilitera le calcul de ces changements de vitesse.

Si l'on appelle d le diamètre des roues en mètres, la vitesse V en km : h. s'exprime en fonction du nombre de tours de l'essieu par minute N par la relation

$$V = \frac{2\pi N d}{1000} \times 60 = 0{,}377\, N d.$$

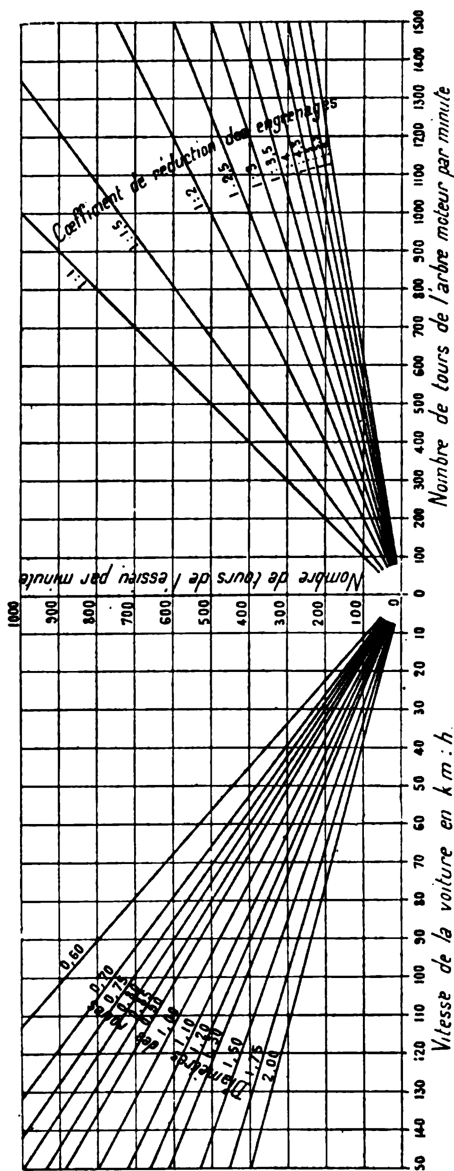


Fig. 811. — Relations graphiques entre la vitesse d'une voiture et les vitesses angulaires de l'arbre et de l'essieu, suivant le diamètre des roues et le coefficient de réduction des engrenages.

La figure 811 donne sous forme graphique la relation entre V et N pour différentes valeurs de d, ainsi que les nombres de tours de l'arbre moteur correspondant à diverses réductions d'engrenages.

Soit, par exemple, une voiture munie de roues de 0,70 m. devant marcher à 40 km : h. ; la partie gauche de l'épure indique que l'essieu fera environ 300 tours ; soit $\frac{1}{3}$ la réduction d'engrenages : la partie droite indique 900 tours comme vitesse de l'arbre moteur.

Quant aux changements de l'enroulement induit, ils entraînent, comme on l'a vu plus haut (p. 93), des modifications de vitesse sensiblement en raison inverse des nombres de spires totaux N et N', ou plus exactement, si l'on tient compte des effets secondaires indiqués,

$$\frac{V'}{V} = \frac{N}{N'} \frac{U - r'I + \varepsilon}{U - rI + \varepsilon}.$$

Grâce à la possibilité de modifier le diamètre des roues, les engrenages et le nombre de spires de l'armature, on peut proportionner facilement la vitesse des moteurs à la vitesse ou à l'accélération nécessitée par les besoins de l'exploitation. Comme nous l'avons dit déjà au chapitre V, une modification d'enroulement ne modifie pas sensiblement le couple du moteur ; la puissance de celui-ci se trouve donc réduite à peu près comme la vitesse, et même plus vite parce que les enroulements en fil fin ont une densité de courant un peu plus élevée que ceux en gros fil et que le rendement est réduit avec la vitesse, comme on l'a vu au chapitre IX.

Il faut avoir ces remarques présentes à l'esprit quand on change le bobinage d'un induit. Les changements d'engrenages ou de roues n'entraînent pas les mêmes conséquences. On a vu au chapitre IV les valeurs limites qu'on peut adopter en pratique pour réaliser l'utilisation maxima.

Modification de la vitesse sur une rampe donnée par variation du champ ou de la tension. — Les courbes de vitesse dont nous venons de faire usage, sont rapportées, en général, à un seul moteur sans interposition d'aucune résistance en série. Elles conviennent donc aux voitures à équipement simple. Pour les voitures à double équipement, on peut les employer également en doublant les efforts et conservant les mêmes vitesses si les moteurs sont en parallèle, ou les réduisant au contraire de moitié si l'on met les moteurs en série. Nous avons donné plus haut (p. 155) des indications détaillées sur ce sujet.

De même nous avons montré que lorsqu'on shunte les inducteurs ou qu'on commute leurs bobines (méthode Sprague), il faut tracer de nouvelles courbes, comme s'il s'agissait d'un moteur différent. C'est ainsi, par exemple, que nous donnons pour les moteurs G. E. 800 (fig. 805) deux courbes correspondant l'une au plein champ, l'autre au champ réduit. Lorsqu'on ne possède pas ces secondes courbes déterminées expérimentalement, on peut y suppléer aisément par le calcul, comme on l'a vu au chapitre X (p. 143).

En effet, à courant égal I dans l'induit, l'addition d'un shunt de

résistance S aux bornes d'inducteurs de résistance R réduit les ampères-tours dans le rapport

$$\frac{m'}{m} = \frac{S}{R + S}.$$

Si l'on commute les 3 galettes d'un enroulement Sprague, on trouvera de même la variation du nombre d'ampères-tours produite à courant égal.

Dans tous les cas, ce rapport $\frac{m}{m}$ sera une constante indépendante du courant. Le courant nécessaire pour produire la même force électromotrice sous les excitations différentes du moteur variera dans la proportion inverse $\frac{m}{m'}$. Si l'on néglige les petites différences de chute de voltage et de réaction dans l'armature produites par des courants différents, on arrive à cette conclusion qu'à vitesse égale une réduction d'excitation équivalant à une réduction du nombre de spires dans le rapport $\frac{m'}{m}$ se traduit sensiblement par un accroissement de courant dans le rapport $\frac{m}{m'}$.

D'autre part, à excitation égale, les efforts sont proportionnels aux courants d'armature. Donc, à vitesse égale, les efforts et les courants seront multipliés par le rapport $\frac{m}{m'}$; il suffira, par suite, de conserver les mêmes courbes en réduisant à la fois les échelles des courants et des efforts proportionnellement au rapport $\frac{m'}{m}$, sans toucher à l'échelle des vitesses.

Enfin, nous avons vu aussi (p. 129) qu'en appelant U la tension de distribution, r_a la résistance d'armature et r_i celle des inducteurs, ε la réaction d'induit, l'addition d'une résistance supplémentaire R fait varier la f. é. m. dans le rapport [1]

$$\frac{E'}{E} = \frac{U - (R + r_a + r_i)\,I + \varepsilon}{U - (r_a + r^{i})\,I + \varepsilon} = 1 + \frac{RI}{U - (r^{a} + r^{i})\,I + \varepsilon}.$$

La vitesse varie dans le même rapport. On peut donc, en lisant pour chaque valeur de l'effort la valeur I du courant correspondant, en déduire d'abord la vitesse pour $R = 0$, puis la multiplier par la parenthèse calculée d'après cette valeur.

[1] Dans le cas d'un moteur en série ; nous négligeons ordinairement ε.

Au dénominateur, le terme $(r_a + r_i) I - \varepsilon$ étant petit devant U, on a sensiblement

$$\frac{V'}{V} = 1 - \frac{RI}{U}.$$

Conditions pratiques du réglage de la vitesse. — Pour que la traction soit économique, on ne doit jamais marcher d'une manière prolongée avec des résistances en série ; celles-ci ne doivent être employées que pour les démarrages : il n'y a donc qu'un petit nombre de touches sur lesquelles on puisse maintenir le régulateur. Dans la régulation série-parallèle, l'une des combinaisons série ou parallèle est elle-même d'un emploi forcément très limité, car on ne peut songer à faire varier fréquemment la vitesse du simple au double. Si l'on a affaire à une ligne à la fois urbaine et suburbaine, on pourra employer la combinaison série en ville et la combinaison parallèle à l'extérieur ; mais s'il s'agit d'une ligne seulement urbaine, il faudra s'arranger à marcher normalement en parallèle et réserver la combinaison série pour les démarrages ou les rampes exceptionnelles, sous peine de perdre le principal avantage de la traction électrique, qui est la vitesse.

Il résulte de ces remarques qu'en fait on n'est pas libre, comme on pourrait le croire, de réaliser une vitesse constante avec les voitures équipées avec des moteurs en série, même avec l'emploi du régulateur de marche.

Celui-ci permet seulement de réaliser une ou deux et exceptionnellement trois ou quatre courbes de vitesse en fonction du courant, au lieu d'une seule.

Il est nécessaire de tenir compte de ce fait quand on choisit un moteur pour un service donné sur de longs parcours comme ceux des chemins de fer.

Choix d'un moteur pour un service donné. — Le choix d'un moteur en vue d'un service de traction déterminé dépendra, en général, des données suivantes :

a. Profil en long et tracé de la voie;

b. Vitesse moyenne de marche entre stations qu'on désire obtenir sur le parcours considéré;

c. Intervalle entre les stations;

d. Durée des arrêts ;

e. Vitesse maxima fixée par les règlements;

f. Effort maximum permis par l'adhérence.

De la connaissance du profil et du tracé on peut déduire, comme on l'a vu au § 1, l'effort de traction nécessaire sur chaque partie du parcours et l'effort moyen sur la ligne. On doit pouvoir atteindre la vitesse maxima sur les parties en palier et n'avoir besoin des freins qu'en pente ; le moteur devra donc réaliser l'effort correspondant aux paliers avec une vitesse égale au maximum imposé. Il devra, en outre, réaliser l'effort moyen à une vitesse voisine de la vitesse moyenne désirée ; la valeur de cette moyenne se rapprochera d'autant plus de la valeur maxima que les vitesses des moteurs sur les différentes rampes présenteront moins d'écart.

L'effort maximum prolongé correspondant à la plus forte rampe à franchir doit pouvoir être fourni sans que le courant correspondant détériore le moteur.

Enfin, l'effort maximum dont le moteur est susceptible temporairement sans détérioration devra remplir trois conditions :

1° Etre égal à l'effort résistant maximum à vaincre pour le démarrage de la voiture ou du train chargé au point d'arrêt le plus défavorable avec l'accélération reconnue nécessaire ;

2° Etre au moins égal à l'effort nécessaire pour démarrer avec une faible accélération au point le plus défavorable du parcours ;

3° Ne pas dépasser l'effort limite permis par l'adhérence.

Nous distinguons les conditions 1 et 2 parce que nous supposons un service à *arrêts fixes*, seul système rationnel pour la traction mécanique (voir t. I, p. 339). Les arrêts étant déterminés d'une manière invariable, on peut en choisir les emplacements de façon à éviter les démarrages trop difficiles, c'est-à-dire en dehors des courbes à faible rayon ou des fortes rampes. En cas d'arrêt *accidentel* sur ces parties de ligne défavorables, on peut admettre comme suffisant, vu le caractère exceptionnel du fait, de pouvoir faire démarrer les voitures avec une très faible accélération.

Quant à l'effort adhérent, on verra plus bas comment il limite l'effort utile possible ; il est inutile de le dépasser, puisque cela produirait le patinage. On supposera pour ce calcul qu'il peut être porté à son maximum (voir p. 486) par l'emploi du sable.

Mais ces remarques supposent essentiellement qu'on a affaire à des parcours sans arrêts assez longs pour qu'on puisse atteindre des régimes permanents. Lorsque les arrêts sont très rapprochés, la voiture passe directement du régime varié de l'accélération au régime du ralentissement par suppression de courant et même par application des freins, sans avoir pu atteindre la vitesse normale qu'elle prendrait dans un parcours indéfini sur une même rampe ; la réalisation d'une vitesse uniforme sur diverses rampes importe alors assez peu, et ce qu'il faut surtout rechercher, c'est une accélération rapide et économique à la fois. Le moteur doit, dans ce cas, être choisi de façon à donner une vitesse normale supérieure à la vitesse moyenne entre stations et quelquefois même supérieure à la vitesse de marche maxima entre arrêts.

On voit que le choix rationnel d'un moteur ou même simplement la fixation du programme des conditions qu'il devra remplir est chose assez délicate. Aussi, pour éclaircir ces indications d'ordre général, avons-nous cru utile de donner dans un autre paragraphe (§ 4) des exemples des principaux cas d'utilisation qu'on rencontre dans la traction électrique à ce point de vue, et au chapitre XIV des applications numériques.

Dans la pratique, le choix est bien simplifié par le fait que les types établis par les constructeurs sont généralement calculés en vue de vitesses en usage courant. Il faut éviter cependant de confondre les usages américains et les usages européens. Le nombre de spires d'armature des moteurs américains doit être accru d'environ un tiers pour qu'ils conviennent au service européen. C'est ainsi que le moteur G. E. 800, type américain, a 3 spires par section, et le type européen, 4. Il va sans dire que la section du fil est diminuée dans une proportion au moins égale, en sorte que le moteur européen ne donne pas un couple sensiblement plus fort que l'américain. On vient, du reste, de voir comment on peut déterminer approximativement les changements de vitesse produits par un changement du nombre de spires de l'induit.

Remarques sur les équipements multiples. — On a vu au chapitre IX que le cas de l'équipement multiple se ramène aisément à

celui de l'équipement simple. Mais il se présente, pour une automobile munie de deux ou plusieurs moteurs, des particularités qu'il est nécessaire de connaître pour savoir prévoir les inconvénients qui peuvent se produire.

Tout d'abord, le courant ne se partage pas toujours également entre les divers moteurs, lorsqu'ils sont en parallèle, pour les motifs qui ont été indiqués plus haut (p. 117), c'est-à-dire surtout à cause des petites inégalités inévitables des champs inducteurs ou des vitesses des moteurs (par suite d'une différence de diamètre des roues). On a vu que ces dissymétries peuvent être corrigées dans le cas de moteurs en dérivation et que, dans le cas de moteurs en série, il s'établit une sorte de compensation naturelle par suite de l'augmentation de la force contre-électromotrice du moteur qui a le plus fort courant. Les charges n'en sont pas moins toujours sensiblement différentes pour les deux machines d'une même voiture. Lorsqu'aucune précaution n'est prise pour les égaliser, les différences atteignent facilement 3 à 4 chev. sur les voitures à deux moteurs de 25 chev., soit plus de 10 p. 100 de la puissance moyenne.

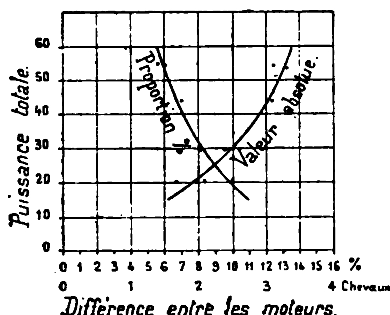


Fig. 812. — Exemple d'inégalités de charge entre deux moteurs d'un même équipement.

La figure 812 indique, par exemple, les résultats constatés par M. Hering sur une voiture des tramways de Baltimore équipée avec deux moteurs Westinghouse n° 3 de 25 chev. La différence trouvée rentre dans la moyenne de celles qu'on constate journellement. Telle qu'elle est, elle ne présente pas d'inconvénients sérieux; mais, si elle devenait plus forte, on ne pourrait faire travailler les moteurs à la pleine puissance prévue sans occasionner au plus chargé un échauffement sensible.

La figure 813 donne un autre exemple emprunté aux expériences déjà citées de MM. Curtiss et Pond, et qui se rapporte à une voiture à quatre moteurs de la ligne de Buffalo à Niagara Falls. Elle représente les courbes de courant relevées simultané-

ment sur les quatre moteurs; on voit que les quatre courants restent sensiblement égaux pendant une grande partie du parcours, mais qu'ils présentent cependant à certains moments, évidemment par suite d'une inégale répartition de la charge entre les essieux, des différences importantes, qu'il serait difficile d'attribuer uniquement à une imparfaite similitude des moteurs.



Fig. 813. — Courbes comparatives des courants consommés par les moteurs d'une automobile à bogies du tramway de Buffalo à Niagara Falls.

En outre, les équipements multiples donnent lieu à des patinages partiels qui peuvent entraîner des pertes d'énergie sensibles et que nous étudierons plus loin en détail (voir p. 499).

II. — Mode d'application de l'effort moteur

Adhérence. — On appelle *adhérence* la résistance au glissement des roues sur les rails, grâce à laquelle les roues motrices peuvent prendre appui sur les rails pour déterminer l'avancement du véhicule. Elle semble provenir de l'engrènement des aspérités des surfaces en contact, qui ne sont jamais parfaitement polies ; lorsque ces aspérités sont comblées par de la boue, par exemple, ou que les surfaces ont été polies par un frottement prolongé, l'adhérence diminue. Dans les conditions normales, elle est toujours supérieure au frottement de glissement. Celui-ci varie avec la vitesse : d'après les expériences du capitaine Douglas Galton[1], le coeffi-

[1] *Proc. Inst. Mech. Eng.*, juin et octobre 1878.

cient f entre rails et roues atteint 0,072 à la vitesse de 20 km : h. et s'abaisse à 0,04 à la vitesse de 80 km : h. Le coefficient d'adhérence, au contraire, peut atteindre sur une voie de chemin de fer sèche et propre 0,20 à 0,25, exceptionnellement dans les pays secs 0,30, sur des rails lavés à grande eau 0,20; l'humidité, le brouillard l'abaissent à 0,10; la présence de boue ou de feuilles sur les rails le réduit encore davantage; on peut admettre en moyenne 0,14 ou $\frac{1}{7}$ sur les chemins de fer.

Sur les tramways, dont les rails sont rarement propres, il est prudent de ne pas compter sur un coefficient moyen de plus de 0,10 ou 0,05 au minimum; on peut atteindre au contraire 0,15 en projetant du sable sur les rails à l'aide de sablières.

Le sable a l'inconvénient d'accroître l'usure des bandages et d'augmenter le coefficient de roulement; aussi M. Riggenbach avait-il proposé de le remplacer par un lavage au moyen d'un jet d'eau projeté en avant des roues; mais ce procédé, qui use beaucoup d'eau sans donner une adhérence bien élevée, ne s'est pas répandu, et c'est encore au sable qu'il convient de recourir pour les tramways. Il est à recommander, en tout cas, de faire nettoyer et laver fréquemment les parties de voie situées sur de fortes rampes.

On appelle *poids adhérent* d'une automobile le poids supporté par les roues motrices; si tous les essieux sont moteurs, c'est le poids total de la voiture; si un seul essieu est moteur, c'est la portion de poids correspondante.

Soient P' ce poids et a le coefficient d'adhérence; l'effort maxima que l'automobile peut exercer tangentiellement aux rails sans qu'il y ait glissement des roues est $P'a$: c'est ce qu'on appelle l'*effort adhérent*. Si cet effort est dépassé, les dentures microscopiques des roues et des rails cèdent, et les roues *patinent*; le coefficient d'adhérence est alors remplacé par un coefficient de frottement, et l'effort tangentiel devient $P'f$, au lieu de $P'a$.

La figure 814 donne sous forme graphique les valeurs de l'effort adhérent en fonction du poids correspondant pour les valeurs principales du coefficient d'adhérence énumérées ci-dessus et fait mieux ressortir celles-ci.

Tant que le glissement reste lent, le coefficient de frottement est sensiblement égal au coefficient d'adhérence, et il peut y avoir à la fois glissement et propulsion du véhicule : c'est ce qu'on nomme le *patinage partiel.* Le chemin décrit par un point de la jante des roues est plus long que celui franchi par la voiture ;

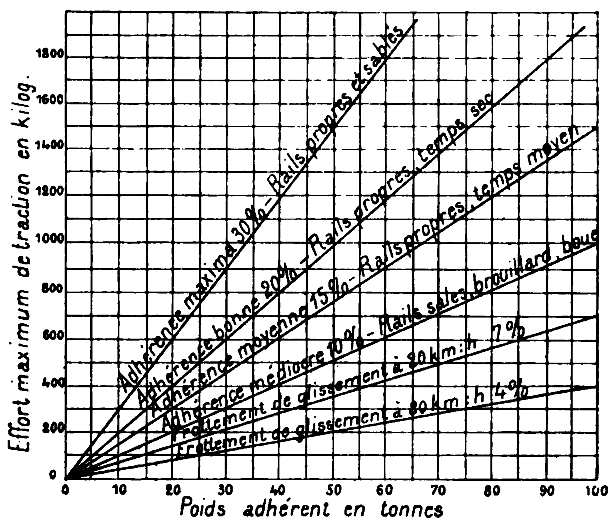


Fig. 814. — Valeurs réalisables de l'effort adhérent en fonction du poids adhérent dans diverses circonstances.

soit $(l - l')$ leur différence pendant un certain temps ; le travail perdu par le frottement dû au patinage est

$$P'f(l - l').$$

Il se produit très fréquemment des pertes de ce genre par suite de l'inégalité du diamètre des roues et du déplacement de la charge de la voiture, comme on le verra plus loin (p. 499). Lorsque le couple moteur appliqué à l'essieu varie dans de grandes proportions, comme c'est le cas dans les automobiles à vapeur ou à air comprimé, il peut se produire un patinage pendant une fraction de tour des roues. A ce point de vue, les moteurs électriques présentent pour la traction un avantage considérable puisque leur couple reste uniforme pendant la rotation.

Lorsque la vitesse de glissement de la roue par rapport au rail s'accroît, f diminue rapidement et il peut arriver que la voiture

s'arrête tandis que les roues continuent à tourner très vite : c'est alors le *patinage complet*. Le coefficient f tend dans ce cas vers la limite 0,04, de sorte que l'effort appliqué aux rails peut tomber à la moitié ou au tiers de la valeur qu'il avait avant de dépasser l'effort correspondant à la limite d'adhérence.

Dans la traction des automobiles, on doit donc éviter de dépasser la limite de l'effort adhérent et chercher, d'autre part, à rendre le poids adhérent aussi grand que possible par rapport au poids total de la voiture.

Conditions limites de marche d'une automobile. — En admettant même que la puissance du moteur d'une automobile soit indéfinie, celle-ci ne pourra cependant franchir certaines rampes, ni dépasser certaines accélérations, ni remorquer plus d'un certain poids, parce que l'effort que ses roues peuvent exercer tangentiellement sur les rails est limité par le patinage. Il est très important de connaître ces limites ; nous y arriverons en écrivant l'équation générale du mouvement d'une automobile, que nous supposerons d'abord marchant à vitesse constante.

Les forces auxquelles la voiture est soumise sont de deux sortes : il y a d'une part les forces intérieures, qui sont l'effort moteur produit par la dynamo et les forces de frottement, et d'autre part les forces extérieures, qui sont les forces tangentielles, dont nous appellerons la somme T, appliquées à la jante des roues pour produire la propulsion de la voiture, les forces normales, qui produisent le travail de roulement (que nous avons appelé r''P), et enfin les forces constituant la résistance extérieure. Nous supposerons d'abord qu'il s'agit d'une automobile ayant tous ses essieux moteurs ; le poids adhérent est alors le poids total P de cette automobile.

Il doit y avoir à chaque instant équilibre entre les forces *extérieures* au système ; si nous les projetons sur la direction du rail, en appelant X la somme de ces projections, les forces normales disparaissent et l'effort de traction T doit être égal à X.

D'autre part, l'effort moteur à la jante F, équivalent au travail produit par le moteur sur l'essieu, doit être égal à la somme de tous les efforts résistants, c'est-à-dire, en appelant r' le coefficient

de frottement des essieux dans les boîtes à huile et coussinets (voir les notations, p. 432),

$$F = X + Pr' = T + Pr.$$

On en déduit

$$T = F - Pr',$$

c'est-à-dire que *l'effort tangentiel T exercé entre la jante des roues et le rail est égal* non pas, comme on le dit généralement, *au produit du poids par le coefficient total de traction*, mais à ce produit *diminué des résistances passives*. L'erreur, assez faible du reste, que l'on commet souvent en écrivant

$$T = F$$

provient de ce qu'on oublie la distinction fondamentale entre les forces intérieures et les forces extérieures au système.

Dans le cas général, ces forces extérieures sont le poids du véhicule, la résistance de l'air et le frottement contre les rails dans les courbes[1]. En outre, si l'automobile remorque une ou plusieurs voitures d'attelage de poids Q ayant un coefficient de roulement ρ, la barre d'attelage exerce sur l'automobile une force extérieure ayant pour projection sur le rail

$$Q \sin \alpha + Q\rho = Q\left(\frac{i}{\sqrt{1 + i^2}} + \rho\right),$$

ou sensiblement $Q(i + \rho)$.

Enfin, si la vitesse varie, l'effet de l'accélération équivaut à une autre force extérieure ayant pour valeur le produit de la masse totale par l'accélération.

La force T exercée tangentiellement au rail par les roues d'une automobile remorquant un train sur une rampe i et avec une accélération $\frac{dV}{dt}$ a donc pour expression générale, en conservant les notations du § 1,

$$T = (P + Q)\left(i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + Q\rho + Z.$$

[1] Nous supposons ici, suivant les conventions ordinaires, que la résistance au roulement d'une roue sur un rail est équivalente à l'effort d'une force normale au rail et appliquée en avant du point de contact de la roue. En réalité, il existe une composante tangentielle, mais elle n'a qu'une valeur négligeable.

Telles sont les équations du mouvement d'une automobile à essieux tous moteurs.

Lorsque l'un seulement des essieux est moteur, il faut remplacer dans les équations précédentes le poids P par le poids adhérent P′ correspondant à l'essieu moteur et englober dans le poids remorqué le poids P″ reposant sur les essieux non moteurs. On a alors :

$$T = (P + Q)\left(i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + (P'' + Q)\rho + Z,$$
$$F = T + P'r'.$$

Les roues patinent lorsque l'effort T dépasse l'effort adhérent, produit du poids adhérent P′ par le coefficient d'adhérence *a* ; la valeur maxima de T est donc

$$T = P'a,$$

et, par suite, la condition limite, dans le cas le plus général, est

$$(P + Q)\left(i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + (P'' + Q)\rho + Z \leq P'a.$$

On déduit aisément de cette condition générale toutes les limites particulières qui peuvent arrêter le fonctionnement de l'automobile.

1° *Rampe maxima franchissable* en alignement droit et à vitesse constante, en supposant la résistance de l'air négligeable.

La relation précédente se réduit, dans ces conditions, à

$$(P + Q)\,i + (P'' + Q)\rho \leq P'a,$$

d'où

$$i_{max} = \frac{P'a - (P'' + Q)\rho}{P + Q}.$$

S'il s'agit d'une automobile seule avec tous ses essieux moteurs, il reste simplement

$$i_{max} = a,$$

c'est-à-dire que la rampe maxima a même valeur que le coefficient d'adhérence [1].

[1] C'est par suite de l'erreur signalée à la page précédente que de bons auteurs écrivent à tort

$$i_{max} = a - \rho.$$

Si une partie seulement du poids est utilisée pour l'adhérence, on a

$$i \leq \frac{P'a - P''\rho}{P},$$

et la rampe limite est alors d'autant plus faible que $\frac{P'}{P}$ est plus petit.

2° *Poids maximum pouvant être remorqué* dans les mêmes conditions sur une rampe i, en alignement droit.

La même inégalité donne immédiatement

$$Q_{max} = \frac{P'(a-i)}{\rho + i} - P''.$$

3° *Accélération maxima réalisable* sur cette rampe.

On a de même

$$(P + Q)\left(i + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + (P'' + Q)\rho \leq P'a,$$

d'où

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = g\,\frac{P'a - (P'' + Q)\rho}{P + Q} - gi = g\,(i_{max} - i),$$

i_{max} étant la rampe maxima franchissable déterminée au 1°.

Dans le cas d'une automobile isolée à poids total adhérent, il reste simplement

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = g\,(a - i).$$

Exemples. — Il est facile de faire l'application de ces formules. Supposons, par exemple, une automobile de 10 t. à poids total adhérent, remorquant une voiture de 5 t. sur une ligne où le coefficient d'adhérence est $a = 0{,}10$ (ou 100 kg. par tonne) et le coefficient de roulement $\rho = 0{,}008$ (ou 8 kg. par tonne) pour la voiture d'attelage.

La rampe maxima praticable en alignement droit sera

$$i_{max} = \frac{10 \times 0{,}100 - 5 \times 0{,}008}{10 + 5}$$

$$= \frac{0{,}96}{15} = 0{,}064 \text{ m. par mètre.}$$

L'accélération maxima sera, en palier,

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = 9{,}81 \times 0{,}064 = 0{,}628 \text{ m : s. par seconde,}$$

et sur rampe de 0,004,

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = 9{,}81 \times (0{,}064 - 0{,}004) = 0{,}589 \text{ m : s. par seconde.}$$

La même automobile marchant isolément pourrait gravir une rampe de 0,100 et réaliser en palier une accélération de 0,981 m : s. par seconde; sur une rampe de 0,050, elle pourrait traîner un poids maximum

$$Q_{max} = 10 \frac{0{,}10 - 0{,}05}{0{,}008 + 0{,}05} = 8{,}62 \text{ t.}$$

Influence du type de truck et du mode d'équipement sur l'adhérence d'une automobile électrique. — Il est à remarquer que le rapport du poids adhérent au poids total d'une automobile ou d'une voiture locomotrice électrique peut varier dans d'importantes proportions suivant la disposition des moteurs et du truck.

Les voitures à quatre roues présentent l'adhérence totale si elles sont munies de deux moteurs ou d'un moteur actionnant à la fois les deux essieux [1]. Mais ces voitures prennent assez facilement un mouvement de tangage, produisant des variations périodiques entre les charges des deux moteurs, ce qui peut réduire un peu le rendement. D'autre part, le grand porte-à-faux des plates-formes et la préférence marquée des voyageurs pour la plate-forme d'arrière favorisent les inégalités permanentes de charge mentionnées plus bas et d'où résultent des patinages partiels.

Si l'on n'emploie qu'un moteur et que l'essieu qui le porte se trouve ainsi déchargé au profit de l'autre, il peut y avoir manque d'adhérence au démarrage. Quand, au contraire, elles sont équilibrées, les voitures à un seul essieu moteur présentent un poids adhérent

$$P' = \frac{p}{2} + p' + \frac{\Pi}{2},$$

en appelant p le poids du truck et de la caisse, p' le poids du moteur et Π celui des voyageurs ; pour se donner une marge de sécurité, on fera bien dans le calcul de négliger $\frac{\Pi}{2}$.

Les voitures à bogies reçoivent rarement quatre moteurs, à l'exception des locomotrices ou automobiles puissantes comme celles du pont de Brooklyn, du mont Snaefell, du réseau de la Haute-Silésie, etc., qui ont alors l'adhérence totale; sur les autres, par raison d'économie et de meilleur rendement, on ne met ordinairement que deux moteurs, soit un par bogie, soit tous deux sur le même bogie.

La première solution, qu'on a vue appliquée notamment sur les voitures du métropolitain de Budapest, donne pour le poids adhérent la même expression que ci-dessus et l'on peut compter d'une façon certaine sur un poids adhérent de 50 p. 100 au moins du poids total. On peut accroître encore cette propor-

[1] Voir t. I, p. 99.

tion par l'emploi des bogies à adhérence maxima décrits au chapitre VI (t. I, p. 289) et dont la figure 815 rappelle suffisamment le principe : le centre d'articulation du truck est placé à peu près à l'aplomb de l'essieu moteur, en sorte que celui-ci supporte presque toute la charge W transmise au pivot; on est obligé cependant de ne pas décharger complètement l'autre essieu, parce que le moteur d'arrière tend à être soulevé dans le sens de la flèche Z par l'attaque du pignon A sur la roue dentée B et à entraîner avec lui l'essieu libre, qui risquerait ainsi de dérailler, surtout dans les courbes; on a vu plus

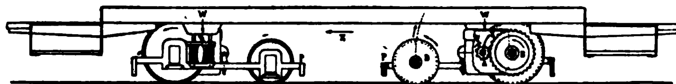


Fig. 815. — Schéma de trucks à adhérence maxima.

haut (t. I, p. 290) les artifices qui peuvent être employés pour augmenter automatiquement la pression sur cet essieu lors du pivotement du truck.

La seconde solution est généralement préférée aujourd'hui, parce qu'elle réduit de moitié le nombre des trucks munis de moteurs et facilite ainsi beaucoup l'entretien. Au point de vue de l'adhérence, elle paraît moins avantageuse en ce qu'elle n'assure pas l'utilisation certaine du poids des voyageurs. Par exemple, sur le schéma de droite de la figure 816, où l'on a supposé ceux-ci groupés à l'arrière, la charge mobile SL qui en résulte porte presque entièrement sur les roues porteuses, sans que les roues motrices (hachurées) en



Fig. 816. — Schéma comparatif montrant l'utilisation des charges pour l'adhérence dans un truck radial et dans un double truck (voiture à bogies). Les hachures indiquent les roues motrices.

profitent. Mais, en pratique, cet inconvénient a été reconnu assez faible, et l'expérience des métropolitains américains où cette disposition est employée montre, comme on le verra au § 3, que le poids adhérent est encore bien suffisant dans ces conditions pour les accélérations rapides qu'exige ce genre de service, même avec deux ou trois voitures remorquées.

Enfin, les trucks à trois essieux convergents (voir t. I, p. 282) donneraient, d'après leur principal constructeur en Amérique, M. W. Robinson[1], avec leurs deux essieux extrêmes moteurs, un poids adhérent de près de 95 p. 100, même avec la charge excentrée de la figure 816, tandis qu'en supposant cette charge égale à 15 p. 100 de la charge totale, le poids adhérent, dans le cas de la voiture à bogies, se réduirait à 42 p. 100.

Traction par locomotives. — Dès que les trains à remorquer deviennent un peu considérables, on trouve intérêt, pour sim-

[1] *Street Railway Journal*, juillet 1895.

plifier l'entretien du matériel, à réduire le nombre des voitures motrices ou à construire des locomotives séparées. Ce dernier système devient nécessaire également quand il s'agit de développer des puissances relativement grandes sous un faible gabarit, comme dans les mines ou sur certains métropolitains souterrains tels que les chemins de fer tubulaires de Londres.

Toutes les relations que nous venons de donner s'appliquent encore dans ce cas, en appelant P le poids de la locomotive et Q celui des voitures remorquées, si le coefficient de roulement ρ du matériel remorqué est applicable à la locomotive. Si celle-ci a un coefficient différent ρ', l'inégalité fondamentale devient, en appelant P′ son poids adhérent et P″ le reste de son poids total,

$$(P + a)\left(i + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) + P''\rho' + Q\rho + Z \leq P'a;$$

on en déduit comme ci-dessus les formules donnant les limites de fonctionnement, qui diffèrent peu des précédentes, notamment l'expression de la rampe limite

$$i_{max} = \frac{P'a - P''\rho' - Q\rho}{P + Q}.$$

Au point de vue des applications, ces limites sont d'autant plus étroites que le poids du train remorqué est plus considérable relativement au poids adhérent. Lorsque les trains sont très lourds ou que le coefficient d'adhérence est très faible, comme c'est, par exemple, le cas dans les mines, les locomotives électriques doivent souvent avoir la totalité de leurs essieux moteurs. Dans ce cas, la limite des rampes devient

$$i_{max} = \frac{Pa - Q\rho'}{P + Q} = a - \frac{Q}{P + Q}(a + \rho'),$$

au lieu de a pour une automobile. Cette expression met bien en évidence l'influence du poids remorqué Q.

Inversement, le poids qu'il est possible de remorquer sur une rampe donnée i est au maximum, en supposant $\rho' = \rho$,

$$Q_{max} = \frac{P(a - i)}{\rho + i}.$$

La figure 817 représente les valeurs du rapport $\frac{Q}{P} = y$ données par cette formule dans l'hypothèse où $\rho = 5$ kg : t. et pour les valeurs du coefficient d'adhérence suivantes :

$$a = 5,\ 10,\ 15 \text{ et } 20 \text{ p. } 100.$$

Ces courbes sont des hyperboles. On voit combien le rapport du poids remorqué ou utile au poids de l'organe moteur ou poids mort

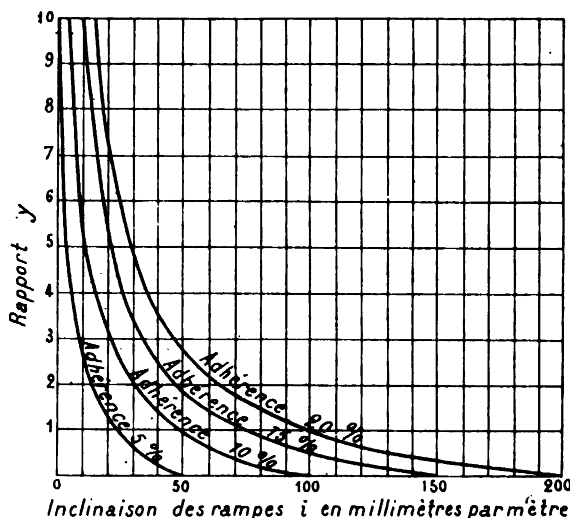


Fig. 817. — Courbes de variation de la charge que peut remorquer une locomotive en fonction de la déclivité.

décroît vite quand la rampe augmente ou que l'adhérence diminue.

L'emploi de locomotives limite aussi les valeurs de l'accélération réalisable; c'est pourquoi on doit ordinairement, comme nous l'avons déjà dit (t. I, p. 355) et comme nous le répétons plus loin (p. 586), préférer sur les métropolitains, lorsque le gabarit le permet, des automobiles seules ou remorquant des trains légers.

L'effet utile de la locomotive est mesuré par l'effort qu'elle développe non à la jante, mais au crochet, et que nous appelons F_c. Ce dernier est égal à l'effort moteur reporté à la jante F, diminué de la gravité et des résistances totales appliquées à l'ensemble de la voiture :

$$F_c = F - P\left(i + \rho' + c + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right) - \lambda S V^2,$$

en appelant S la surface de front de la locomotive. A faible vitesse, il reste

$$F_c = F - P\,(i + \rho').$$

Limites pratiques des rampes. — Sur les chemins de fer à vapeur ordinaires, on considère comme un maximum pratique la rampe de 0,025. Ce n'est qu'exceptionnellement et dans les pays de montagne qu'on admet des déclivités dépassant 0,030 ; au delà de 0,070 (valeur réalisée à l'Uetliberg, près Zürich) et même souvent de 0,055, on recourt à la crémaillère : sur une rampe de 0,050, une machine à adhérence ne peut remorquer un poids plus considérable que le sien, tandis qu'au Höllenthal, avec 0,055 de déclivité, les locomotives à crémaillère remorquent 2,5 fois leur poids. Cette limite de 0,050 est fixée par l'adhérence, tandis que celle de 0,025 provient uniquement du défaut de puissance des locomotives. En effet, le coefficient de traction en palier étant très faible (0,005), la moindre rampe nécessite un accroissement *relatif* énorme de l'effort de traction, tandis que la chaudière d'une locomotive n'a qu'une puissance de vaporisation limitée.

Au contraire, sur les lignes de chemins de fer à traction électrique alimentées par conducteur, la puissance disponible est pour ainsi dire illimitée ; on peut donc dépasser la limite de 0,025 autant que le permet le rapport du poids adhérent au poids remorqué.

Il en est a fortiori de même sur les tramways électriques, où, le coefficient de traction étant très élevé, l'influence des rampes est relativement bien moindre que sur les chemins de fer et où la puissance des moteurs électriques présente des limites très larges relativement au poids des automobiles (voir chap. VIII) ; enfin, on n'est pas libre de faire faire des détours à la voie comme pour un chemin de fer. Pour tous ces motifs, les rampes des tramways sont limitées seulement par l'adhérence et non par la puissance ou l'effort disponible. En fait, la déclivité de 0,10 est une limite rarement dépassée ; cependant, en Amérique, on exploite par adhérence des rampes s'élevant jusqu'à 0,14, notamment à San Francisco ; en Europe, on atteint 0,113 à Lausanne et 0,115 au Havre.

Si l'on réunit en un train plusieurs automobiles, chacune d'elles fonctionnant dans les mêmes conditions que si elle était isolée,

on pourra encore franchir la rampe limite égale à l'adhérence. Cette combinaison permet donc d'exploiter par simple adhérence des lignes de chemins de fer présentant des rampes de 0,10 à 0,15. Il est sage de s'en tenir au premier chiffre, si l'on veut pouvoir marcher par tous les temps sans recourir au sable ; quant au second, ce sera pour nous une limite extrême au delà de laquelle il faut recourir à d'autres procédés, par exemple à la crémaillère : le coefficient d'adhérence devient alors infini et la considération de puissance est la seule qui limite les rampes, sans parler des conditions de sécurité.

Il faut remarquer en terminant que la possibilité d'admettre de fortes rampes avec la traction électrique, soit par adhérence, soit par crémaillère, peut permettre de réaliser d'importantes économies sur les dépenses d'infrastructure des lignes de montagne. On devra cependant autant que possible, dans une ligne de ce genre, éviter les déclivités trop inégales et chercher plutôt à les uniformiser, si l'on veut tirer le meilleur parti des moteurs. Une ligne qui présenterait, par exemple, une ou deux longues rampes de 10 p. 100 et le reste de son profil en palier serait peu avantageuse pour une exploitation à vitesse constante, parce que les moteurs devraient être établis en vue de la puissance maxima nécessaire sur ces rampes et travailleraient sur le reste du parcours bien au-dessous de leur régime économique ; on peut, il est vrai, et l'on doit même s'arranger dans ce cas de façon à mettre hors circuit une partie des moteurs lorsque c'est nécessaire, pour faire travailler les autres à pleine charge ; mais le poids mort reste toujours plus élevé que si l'on remplaçait le profil accidenté par une rampe moyenne à peu près uniforme.

Durée minima des mises en vitesse — La question du démarrage, déjà examinée plus haut (p. 446), va être traitée ci-dessous par le calcul en tenant compte du fonctionnement électrique du moteur, ainsi qu'il est nécessaire pour s'en faire une idée exacte. Mais on peut remarquer dès maintenant que la durée de ce démarrage ne peut descendre au-dessous d'un certain minimum, qu'on réaliserait en maintenant pendant tout le temps de la mise en vitesse l'accélération à son maximum possible $\frac{dv}{dt}$, déterminé par l'effort

adhérent, comme on l'a vu (p. 491). Pour réaliser la vitesse V en partant du repos, il faut donc un temps au moins égal à

$$t = \frac{V}{\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max}},$$

et, comme dans le mouvement uniformément accéléré la vitesse moyenne est $\frac{V}{2}$, il faut un parcours minimum

$$e = \frac{V^2}{2\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max}}.$$

Par exemple, dans le cas considéré plus haut (p. 492) d'une automobile de 10 t. remorquant une voiture de 5 t. sur rampe de 0,004 avec une adhérence de 0,10, l'accélération maxima trouvée étant de 0,589 m. : s. par seconde, le parcours minimum pour atteindre une vitesse de 12 km. à l'heure (3,33 m. par seconde) serait

$$e = \frac{(3,33)^2}{2 \times 0,589} = 9,42 \text{ mètres.}$$

Dans le cas d'une automobile seule,

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{max} = g\,(a - i)$$

et par conséquent

$$e = \frac{V^2}{2g\,(a - i)}, \qquad t = \frac{V}{g\,(a - i)}.$$

Ainsi, pour amener une automobile isolée à la vitesse de 12 km. à l'heure ou 3,33 m. par seconde sur une rampe de 0,05 avec une adhérence de 0,15, il faudrait un temps *minimum*

$$t = \frac{3,33}{9,81 \times 0,10} = 3,40 \text{ secondes}$$

et un parcours *minimum*

$$e = \frac{3,33}{2} \times 3,40 = 5,66 \text{ mètres.}$$

Le tableau de la p. 448 peut faciliter ces calculs.

En fait, le parcours théorique minimum correspondant à la valeur limite de *a* sera forcément dépassé de beaucoup, parce qu'on ne peut maintenir pendant tout le démarrage l'effort moteur à

la valeur limite de l'adhérence et qu'on risquerait, d'ailleurs, ainsi de faire patiner les roues ; on verra plus loin (p. 555) les valeurs pratiques à admettre.

Effets de patinage produits par les équipements multiples. — L'emploi de plusieurs moteurs sur une même voiture donne lieu à des effets de patinage partiel qui ne se présentent pas avec un seul et qui méritent un examen attentif non seulement dans le cas des tramways, mais dans tous les problèmes de locomotion électrique où il y a plusieurs essieux moteurs[1].

Si plusieurs essieux sont solidarisés par un moyen quelconque, en particulier par des bielles horizontales, comme dans le système Eickemeyer, ou par des chaînes, peu importe qu'il y ait un ou plusieurs moteurs : ceux-ci n'en font qu'un au point de vue de l'effort de traction qu'ils exercent ; l'adhérence du véhicule est la somme des adhérences de tous les essieux solidaires et, tant qu'elle est supérieure à la somme des efforts de traction, il n'y a pas de glissement. Au contraire, lorsque les divers essieux d'une voiture sont indépendants, comme c'est le cas habituel, l'une des paires de roues peut patiner indépendamment de l'autre, parce que leurs adhérences peuvent être fort inégales. L'inclinaison de la voie, qui déplace le centre de gravité du véhicule, change déjà la distribution des charges sur les essieux ; la répartition inégale des voyageurs à l'intérieur de la voiture et surtout sur les plates-formes la modifie bien plus encore, étant donné le faible empattement de la plupart des voitures de tramways, et il peut arriver que presque tout le poids se trouve reporté sur l'essieu d'arrière, par suite de l'entassement des voyageurs sur la plate-forme correspondante ; les exemples cités plus haut de répartition inégale du courant en sont la preuve.

A côté de ces inégalités de charge, qu'on peut considérer comme permanentes, au moins pendant un certain temps, il faut en signaler d'autres qui se produisent durant un instant très court au passage des irrégularités de la voie : en raison de l'inertie, la

[1] L'attention a été appelée particulièrement sur ce point par un intéressant article de M. P. Hoho (*Éclairage Électrique*, 1895) sur l'emploi d'un ou de deux moteurs pour la traction. Tout en nous inspirant de ce travail, nous traitons ici la question d'une façon un peu différente en tenant compte des variations du frottement.

roue qui passe sur une partie de voie légèrement affaissée, au droit d'un joint par exemple, n'a pas le temps de venir presser sur le rail, même sous l'action des ressorts de suspension, et l'essieu correspondant se trouve ainsi déchargé plus ou moins pendant un temps très court. Le même effet se produit dans les mouvements de tangage si fréquents dans les véhicules à deux essieux rapprochés (voir t. I, p. 259).

Sans insister davantage sur ces causes d'inégalité de charge, examinons-en les conséquences. Considérons, pour simplifier, le cas d'une voiture à deux essieux seulement, et appelons P_1 et P_2 les poids agissant respectivement sur les deux paires de roues ; les valeurs correspondantes des efforts adhérents seront

$$A_1 = a\,P_1 \qquad \text{et } A_2 = a\,P_2,$$

en appelant a le coefficient d'adhérence défini précédemment.

L'effort adhérent total, qui constitue le maximum de l'effort moteur possible, a pour valeur

$$A_1 + A_2 = a\,(P_1 + P_2).$$

Appelons T l'effort de traction total, T_1 et T_2 les efforts de traction individuels exercés par les deux moteurs à *la jante des roues* (frottements du mécanisme déduits). Chacun des efforts T_1 et T_2 est proportionnel au couple du moteur correspondant et par suite est fonction du courant de ce moteur ; on peut donc poser, en supposant les roues et les transmissions des deux essieux semblables :

$$T_1 = \varphi_1\,(I_1), \qquad T_2 = \varphi_2\,(I_2).$$

Les courants étant eux-mêmes, dans le cas de l'alimentation à potentiel constant, simplement fonction de la vitesse, on peut écrire, en définitive :

$$T_1 = \varphi_1\,(V), \qquad T_2 = \varphi_2\,(V).$$

D'autre part, la résistance totale à la traction de la voiture F est aussi, dans le cas général, une fonction ψ de la vitesse

$$F = \psi\,(V)\,;$$

dans le cas des tramways, cette fonction se réduit sensiblement, comme on l'a vu, à une constante.

Tant que, malgré l'inégalité de charge des essieux, les efforts

adhérents restent chacun notablement plus grands que $\frac{F}{2}$, aucune des deux roues ne patine ; en effet, si l'on suppose les moteurs assez peu différents pour qu'à la même vitesse ils développent sensiblement le même couple, ils exerceront tous deux des efforts T_1, T_2 peu différents de $\frac{T}{2}$ et par suite inférieurs aux efforts adhérents A_1 et A_2. En admettant même qu'à égale vitesse les deux moteurs donnent des couples *très différents*, il peut y avoir encoro un bon fonctionnement pourvu que les efforts exercés sur les jantes ne dépassent pas les efforts adhérents correspondants :

$$T_1 < A_1 \quad \text{et} \quad T_2 < A_2.$$

Peu importe, dans ces conditions, que les moteurs soient couplés en série ou en parallèle.

Mais il n'en est plus de même si l'un des efforts adhérents devient insuffisant, par exemple si $A_1 < T_1$; dans ce cas, la roue correspondante patine et n'exerce plus qu'un effort de traction égal à A_1.

Deux cas sont alors à considérer, suivant le mode de groupement des deux moteurs.

1° *Si les moteurs sont couplés en série*, leurs couples peuvent être considérés comme pratiquement égaux, à la même vitesse, et ils présentent une étroite dépendance. Si l'un d'eux se met à patiner, sa vitesse s'accroît de toute celle du glissement, sa force électromotrice augmente, le courant commun diminue et le deuxième moteur, au lieu de venir en aide au premier, est obligé de ralentir. Lorsque la vitesse de régime est atteinte, l'effort du moteur qui patine se trouve égal à l'effort tangentiel dû au frottement, c'est-à-dire à fP_1, en appelant f le coefficient de frottement à la vitesse de glissement réalisée ; l'effort exercé par l'autre moteur est identique, dans l'hypothèse de deux appareils bien semblables ; le total donne $2\,fP_1$, au lieu de $a\,(P_1 + P_2)$. Or le coefficient f est toujours beaucoup plus petit, lorsque le glissement est rapide, que le coefficient d'adhérence ; d'après les expériences déjà citées de M. Douglas Galton [1], confirmant les expériences bien plus anciennes de

[1] *Loc. cit.*

J. Poirée (1851)[1], il peut s'abaisser à 0,04, tandis que le second atteint normalement 0,10 et 0,15; le patinage d'un seul moteur peut donc réduire l'effort moteur utile du simple à la moitié ou au tiers de sa valeur normale.

Si la résistance F à vaincre sur la ligne au point considéré n'est pas supérieure à 2 fP_1, le véhicule continuera à marcher à cette allure, avec patinage d'une paire de roues ; le déplacement de la voiture renouvelant les surfaces en contact fera augmenter le coefficient de frottement et amènera ainsi la disparition du patinage ou tout au moins sa réduction à un simple patinage partiel. Dans le cas contraire, la voiture s'arrêtera et les roues qui patinent continueront à tourner à la vitesse correspondant à cet effort à la jante fP d'après la courbe de couple.

Ces conditions très défavorables peuvent rendre les démarrages difficiles pour une voiture inégalement chargée.

2° *Si les moteurs sont couplés en parallèle*, ils sont indépendants. Le patinage d'une paire de roues se produit encore quand $A_1 < T_1$ et l'effort de traction aux jantes correspondantes se réduit à fP ; mais cela n'entraîne pas le patinage des autres roues, ni la réduction de l'effort de traction du second moteur T_2 ; celui-ci peut croître, au contraire, automatiquement par ralentissement de la voiture jusqu'à un maximum limité par l'échauffement du moteur et qui ne saurait en tout cas dépasser l'effort adhérent correspondant $a\,P_2$. On peut ainsi atteindre un effort de traction total

$$fP_1 + a\,P_2.$$

Si le poids adhérent du deuxième essieu P_2 est suffisant, la voiture pourra donc démarrer, alors qu'elle n'eût pu le faire avec le couplage en série, et même atteindre une vitesse assez grande pour mettre promptement fin au patinage. En outre, le patinage partiel de l'un des moteurs, lorsque la voiture est en vitesse, est deux fois moins sensible, puisqu'il ne se répercute pas sur l'autre.

Les raisonnements précédents sont indépendants du mode d'excitation des moteurs, si les groupements sont faits conformément aux remarques des pages 146 et suivantes. Il y a seulement des différences de valeurs numériques suivant que les moteurs

[1] *Annales des mines*, 5e série, t. XIII, 1858, p. 278.

sont à excitation en série ou à excitation constante; pour les seconds le couple moteur diminue moins vite en cas de patinage, mais les charges sont plus facilement inégales que pour les premiers.

Cette comparaison montre que, pour le démarrage, le couplage des moteurs en parallèle est préférable au couplage en série et c'est à ce motif plus qu'à aucun autre qu'on doit attribuer l'adoption générale de ce mode de groupement sur les tramways électriques pendant les premières années, malgré les inégalités possibles de charge des moteurs et la nécessité d'un isolement plus parfait.

En Europe, quelques maisons s'en tiennent encore pour ce motif à la régulation Sprague avec moteurs en parallèle. Au contraire, en Amérique, tous les constructeurs ont adopté en principe, dans le but d'économiser l'énergie au démarrage, la régulation série-parallèle avec couplage en série à faible vitesse et en dérivation à grande vitesse; mais, pour réduire les inconvénients signalés ci-dessus du patinage, la marche en série doit être employée, ainsi que nous l'avons dit, comme un régime de passage et non comme un régime normal. Même sur de très fortes rampes, comme celles de San Francisco, on trouve un rendement meilleur avec le couplage en parallèle qu'avec celui en série[1]. Ce fait ne peut s'expliquer que par l'importance plus grande des glissements partiels dans le premier cas que dans le second.

Ce n'est pas à dire que le couplage en parallèle les rende absolument négligeables ; car, même dans ce cas, une automobile à essieux indépendants donne lieu à des patinages partiels. Toutes les fois, en effet, que l'adhérence d'un des essieux A_1 diffère peu de l'effort moteur T_1 (à chaque passage de joint, par exemple) ou que les deux roues ont des diamètres légèrement inégaux, ce qui arrive assez fréquemment, il se produit un glissement partiel des roues, qui peut ne durer qu'un instant, mais qui, en se renouvelant, finit par dépenser en frottements une énergie très notable, empruntée en définitive à la ligne. Ces glissements ne pourraient se produire si les essieux étaient commandés par un seul moteur, car l'effort adhérent total resterait alors constant en même temps que le poids adhérent et indépendamment de la répar-

[1] Cf. S. L. Foster, *Street Railway Journal*, septembre 1896.

tition de celui-ci. Des expériences de M. Sever, signalées plus loin, ont mis en évidence des pertes de ce chef atteignant jusqu'à 40 et 50 p. 100 de l'énergie réellement utilisée. En admettant que ces chiffres soient exagérés pour la pratique ordinaire, il n'en est pas moins vrai que la perte peut facilement atteindre sur les lignes ordinaires la valeur de 10 ou 12 p. 100 indiquée par M. Sperry.

Il va sans dire que les remarques précédentes s'appliquent a fortiori à l'emploi de plus de deux moteurs sur un même truck, cas auquel la répartition inégale des charges est également à redouter.

Solidarisation des essieux. — On voit, en définitive, que l'emploi de plusieurs essieux moteurs indépendants sur un véhicule présente deux inconvénients graves : une réduction possible de l'effort disponible au démarrage et une certaine perte sèche d'énergie, même en marche normale.

Pour réduire ces inconvénients, il faut chercher à assurer l'égalisation de la charge des essieux en les écartant autant que possible, en répartissant convenablement les voyageurs et en interdisant les surcharges exagérées des voitures.

L'emploi de moteurs multiples échappe, au contraire, à toute critique quand on rend solidaires les essieux qu'ils commandent. Cette solidarisation est facile à réaliser pour les bogies des locomotives électriques à l'aide de barres d'accouplement, et ce serait une véritable faute que de ne point l'adopter dans ce cas. Elle est plus malaisée quand il s'agit de relier les deux essieux d'une voiture ordinaire. On a essayé dans ce but, comme nous l'avons dit déjà au chapitre IV (t. I, p. 99), l'emploi de cordes en acier et de chaînes de Galle ; mais les premières sont sujettes à glisser, les secondes s'usent et donnent lieu d'ailleurs à une certaine perte d'énergie. Le meilleur dispositf semble être encore celui des bielles d'accouplement ; mais il faut remarquer que lorsque celles-ci sont longues, elles sont sans effet au moment où elles passent dans le plan des essieux ; elles ne s'appliquent d'ailleurs qu'aux trucks rigides.

Pour tourner la difficulté, MM. *Elihu Thomson* et *Rice* ont proposé récemment d'accoupler les essieux non plus mécaniquement, mais par une transmission électrique.

Dans leur dispositif, deux alternateurs polyphasés ont leurs induits calés respectivement sur chacun des essieux et mis en série l'un avec l'autre par trois conducteurs souples reliant les balais de prise de courants polyphasés ; leurs inducteurs sont excités en série avec les moteurs qui actionnent la voiture, mais parcourus par le courant en sens inverse, de façon que les forces électromotrices des deux armatures soient en opposition. Tant que les deux essieux conservent la même vitesse, ces forces électromotrices sont égales et aucun courant ne se produit dans les induits polyphasés. Toute différence de vitesse fait, au contraire, apparaître un courant et donne lieu à un transport d'énergie de l'armature qui tourne le plus vite à celle qui tourne le plus lentement. Cet effet tend à rétablir automatiquement l'équilibre des charges et l'égalité des vitesses entre les essieux.

Ce dispositif est très ingénieux, mais il a contre lui l'encombrement, la complication et la dépense élevée qu'entraînerait forcément son emploi ; il montre, en tout cas, toute l'importance qu'attachent des ingénieurs éminents au problème de la synchronisation des essieux. On pourrait d'ailleurs, croyons-nous, arriver au même résultat plus simplement en plaçant des bagues et des prises de courants polyphasés sur les moteurs eux-mêmes.

III. — Influence du poids mort

Rôle du poids mort dans le rendement de la traction. — Si l'on considère les voitures occupées et les voyageurs comme une charge utile, le poids mort se réduit au poids de l'organe moteur. Celui-ci a une grande influence dans un grand nombre de cas sur les conditions économiques de la traction, surtout dans la traction par locomotive.

Soit P le poids d'une locomotive (ou le poids mort);

— β son coefficient de traction total en palier ;

— Q le poids du train remorqué (ou le poids utile);

— β' son coefficient de traction total en palier;

— i l'inclinaison du profil.

Le rendement de la traction est le rapport de l'effort au crochet à l'effort théorique à la jante :

$$\eta = \frac{F_e}{F} = 1 - \frac{P}{F}(i + \beta)$$
$$= 1 - \frac{P(i+\beta)}{(P+Q)\,i + P\beta + Q\beta'},$$

c'est-à-dire sensiblement $1 - \frac{P}{P+Q}$. Nous avons donné plus haut, au chapitre VIII, des exemples de calcul de ce rendement.

La dernière expression met bien en évidence le rôle fâcheux du

poids mort P dans la traction par locomotives. Cependant, d'autre part, comme on l'a vu plus haut (p. 495), un poids mort important est nécessaire pour l'adhérence. La solution qui s'impose naturellement consiste à le réduire à la plus faible valeur permise par l'adhérence. Nous avons montré précédemment en parlant de la puissance et du poids des locomotives (t. I, p. 487) comment le moteur électrique permet de réaliser un gain à ce point de vue, grâce à son faible poids spécifique et au fait que les locomotives à vapeur sont en général plus lourdes que ne l'exigerait l'adhérence et n'utilisent qu'une partie de leur poids pour celle-ci : on a vu qu'une locomotive électrique peut donner un effort de 1/4 de son poids, au lieu de 1/8 à 1/10. Nous ne reviendrons pas ici sur cette question.

Sur les automobiles à alimentation extérieure, le poids mort se réduit à celui des moteurs et l'adhérence est généralement suffisamment assurée, comme on l'a vu tout à l'heure. Le rendement est donc ici, en faisant $\beta = \beta'$ exactement

$$1 - \frac{P}{P + Q}.$$

On voit combien il est favorisé par l'emploi des moteurs électriques et des automobiles légères auxquelles ils s'adaptent.

On peut se faire une idée pratique du rendement commercial en déterminant, comme nous l'avons fait au chapitre VI (p. 346), le poids total du véhicule par place offerte, et c'est en définitive à cette donnée qu'on peut, lorsqu'on veut les comparer au point de vue de la traction sur des lignes à faibles déclivités, rapporter tous les matériels de traction. Nous avons résumé dans le tableau ci-dessous

TYPE de VOITURE	NOMBRE approximatif de places sans surcharge.	EQUIPEMENT (Nombre et puissance des moteurs).	POIDS APPROXIMATIF de la voiture équipée		POIDS mort approximatif par place offerte.
			à vide.	en charge.	
			Kg.	Kg.	Kg.
Automobile à 2 essieux	30	2 × 15	6 000	8 000	200
»	40	2 × 25	6 700	9 500	170
»	50	2 × 30	7 500	11 000	150
Automobile à bogies.	50	2 × 30	8 500	12 000	170
Voiture d'attelage. .	30		2 000	5 000	70
»	40	»	3 000	6 000	75

quelques moyennes relatives aux voitures électriques les plus usuelles, qui peuvent présenter un certain intérêt à ce point de vue.

Influence du poids spécifique de l'organe moteur. — Les équations précédentes s'appliquent au cas où le poids de l'organe moteur est constant; mais, lorsqu'il s'agit de remorquer un train donné dans des conditions variées, le poids du moteur croît avec la puissance nécessaire. Il est intéressant, à ce point de vue, de mettre en évidence le role du poids spécifique du moteur, c'est-à-dire du poids par unité de puissance.

Appelons :

p le poids spécifique de l'organe moteur;

P le poids total de la locomotive ou du moteur s'il s'agit d'une automobile;

Q celui du train dans son ensemble, moteur non compris;

i l'inclinaison en rampe de la voie;

β le coefficient de traction moyen applicable à l'ensemble du convoi, y compris la résistance de l'air;

V la vitesse;

Π la puissance totale de l'organe moteur;

ϖ la puissance nécessaire pour remorquer l'unité de poids à la vitesse V.

On a, pour définir le poids moteur, la relation

$$P = p\varpi\,(P + Q);$$

d'où

$$P = \frac{Q}{\frac{1}{p\varpi} - 1},$$

et

$$\Pi = \frac{Q}{\frac{1}{\varpi} - p}.$$

Le poids total est

$$P + Q = \frac{Q}{1 - p\varpi}$$

D'où le rendement de la traction

$$\eta = \frac{Q}{P + Q} = 1 - p\varpi.$$

Si l'on prend comme unités la tonne, le kilomètre : heure et le cheval-vapeur et si l'on exprime β et i en kilogrammes par tonne, la valeur de ϖ qui devra être substituée dans ces expressions est la suivante :

$$\varpi = \frac{(\beta + i)\,V}{75 \times 3{,}6} = \frac{(\beta + i)\,V}{270}$$

ou, en écrivant la résistance sous sa forme développée (p. 431),

$$\varpi = \frac{\rho + i + \frac{Z}{P} + \frac{P}{g}\frac{dV}{dt}}{270}\,V.$$

On voit que le rendement diminue très rapidement quand on fait croître i, V et p, et qu'il y a un intérêt capital à réduire le poids spécifique des moteurs.

Ces équations indiquent en outre la vitesse, la rampe et l'accélération limites qu'on peut atteindre pour chaque composition de train, c'est-à-dire pour chaque rapport $\frac{Q}{P+Q}$ donné; car la relation qu'on en déduit,

$$p\varpi = 1 - \frac{Q}{P+Q}$$

ou

$$V\left(V + i + \frac{Z}{P} + \frac{P}{g}\frac{dV}{dt}\right) = \frac{270\left(1 - \frac{Q}{P+Q}\right)}{p},$$

contient au premier membre seulement une fonction de la vitesse V.

La puissance spécifique rapportée au poids total d'une automobile s'obtient, si on le désire, en faisant $Q = 0$.

Application à la traction à grande vitesse. — Appliquons ces considérations, par exemple, à la traction à grande vitesse en régime permanent sur une ligne de chemin de fer, en nous servant des chiffres suivants déduits par M. du Bousquet[1] des expériences qu'il a exécutées sur le chemin de fer du Nord entre 60 et 120 km : h. et extrapolées jusqu'à 200 km : h.[2]

RÉSISTANCE ET PUISSANCE CONSOMMÉE PAR TONNE DE TRAIN
d'après M. du Bousquet.

VITESSE en km : h.	RÉSISTANCE en palier en kg. par tonne. β	PUISSANCE PAR TONNE en chevaux.		
		En pente de 0,005.	En palier.	En rampe de 0,005
50	3	négative.	0,555	1,50
60	4	—	0,89	2,00
70	5	0	1,30	2,60
80	6	0,30	1,77	3,22
90	7,60	0,86	2,53	4,19
100	9,16	1,55	3,40	5,24
110	11	2,44	4,47	6,50
120	13	3,55	5,77	8,00
130	15	4,81	7,21	9,60
140	17,50	6,50	9,00	11,60
150	20	8,33	11,00	14,00
160	22,66	10,46	13,40	16,40
170	25,50	12,90	16,00	19,00
180	28,50	15,66	19,00	22,33
190	31,60	18,70	22,22	25,70
200	35	22,00	26,00	29,60

[1] *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, 5 janvier 1894.

[2] Ces chiffres, qui contiennent la résistance de l'air, sauf sur la surface de front du train, sont du reste inférieurs à ceux des formules en usage sur le P.-L.-M., l'Orléans, l'Est, etc.

On remarquera en passant, d'après ce tableau, qu'une même puissance de 3,5 chev. par tonne permet de marcher à 80 km : h. en rampe de 0,005, à 100 km : h. en palier et à 120 km : h. en pente de 0,005. On voit aussi qu'une machine de 700 chev. au crochet travaillant à son régime maximum ne peut remorquer en pente de 0,005 , à la vitesse de 120 km : h., qu'un train de 200 t., machine non comprise. Ce n'est ni la stabilité de la locomotive ni la sécurité qui limite cette vitesse, mais bien la puissance de la locomotive [1].

Pour gagner quelques kilomètres à l'heure au delà de 100 km : h., la dépense supplémentaire de puissance est presque disproportionnée : par exemple, pour passer de 110 à 120 km : h., il faut dépenser 1 chev. de plus en pente de 0,005 et 1,5 chev. en rampe de 0,005, soit 200 ou 300 chev. pour un train de 200 t. Encore faut-il faire observer que ces chiffres ne tiennent pas compte de la résistance de l'air sur le véhicule de tête, qui vient accroître la résistance totale dans une proportion d'autant plus forte que le train est plus court.

En négligeant cette résistance supplémentaire, nous trouvons que, pour trainer un train de 100 t., il faut un nombre de chevaux

$$\Pi = \frac{100}{\frac{1}{\varpi} - p},$$

nombre très rapidement croissant, comme le montre le tableau ci-après [2].

PUISSANCE NÉCESSAIRE POUR REMORQUER UN TRAIN DE 100 TONNES SUR RAMPE DE 0,005.

VITESSE	PUISSANCE TOTALE au crochet en chevaux, avec un moteur pesant par cheval			
	100 kg.	75 kg.	50 kg.	35 kg.
100	1 100	867	710	640
110	1 850	1 252	1 042	845
120	4 000	2 000	1 333	1 112
130	24 000	3 446	1 843	1 440
140	»	8 932	2 726	1 927
150	»	»	4 662	2 744
160	»	»	8 920	3 705
170	»	»	38 000	5 700
180	»	»	»	9 939

[1] Sur les grandes lignes du réseau du Nord, où les rampes ne sont pas très considérables, la vitesse, réglementée par l'arrêté ministériel de 1853, peut atteindre 120 km : h. Cette limite est atteinte journellement sur certaines pentes sans inconvénient.

[2] Il faut remarquer que l'on ne peut réduire autant qu'on le veut le poids des trains ; en effet, dans ces dernières années, le poids des voitures des trains express a beaucoup augmenté : sur le Nord, il est passé de 7,5 t. pour 24 places à 16 t. pour 27 places, c'est-à-dire à 600 kg. par place dans les voitures à cabinets de toilette, au lieu de 312 kg. dans les anciennes voitures de 1[re] classe (en même temps, on a

La limite pratique de vitesse dépend donc essentiellement de la puissance qu'on peut réaliser pour le moteur. Les anciennes machines à vapeur de 30 t., qui ne développaient que 250 chev., pesaient 125 kg. par cheval et ne pouvaient par conséquent atteindre 100 km : h. avec un train de 100 t. Les locomotives qu'on construit actuellement et qui permettent de réaliser cette vitesse pèsent environ 80 t. et peuvent produire momentanément jusqu'à 1100 chev. au crochet, avec un poids spécifique de 72 kg. par cheval; en dehors des pentes, cette puissance ne suffit pas pour dépasser 120 km : h. Les locomotives électriques pourraient, comme on l'a vu au chapitre VII (t. I, p. 492), être réduites à 50 kg. par cheval, ce qui permettrait, sans dépenser une puissance exagérée, d'obtenir une vitesse de 120 à 130 km : h. en palier.

Ces vitesses ne pourront être dépassées pratiquement que par l'emploi de voitures automobiles, soit isolées, soit groupées en train. Considérons en particulier le cas de l'emploi de grandes voitures de 60 t., comme celle de M. Behr ou Zipernowski (p. 7 et 15). Si l'on admet, pour simplifier, que les coefficients de traction indiqués plus haut s'appliquent encore à ce nouveau matériel sans qu'il soit nécessaire d'ajouter un terme supplémentaire Z pour la résistance de l'air[1], la formule

$$\varpi = \frac{1}{p}$$

indique les vitesses limites suivantes :

POIDS DES AUTOMOBILES p en tonnes par cheval.	VITESSE LIMITE	
	En palier.	Sur rampe de 5 mm : m.
0,100	145	132
0,075	160	148
0,050	183	175
0,035	203	195

augmenté la surface offerte à la résistance de l'air et le diamètre des fusées) ; un wagon-lit ou un wagon restaurant ne pèse pas moins de 30 t. D'après M. du Bousquet, on doit donc considérer un train de 100 t. comme un minimum pratique pour assurer un confort suffisant aux voyageurs.

[1] Cette hypothèse est plausible, grâce à l'emploi d'avant-becs effilés et à la suppression des intervalles entre wagons dont les parties non masquées donnent lieu, d'après les chiffres cités plus haut, à une résistance à peu près équivalente à celle de cet avant-bec. Il est facile, du reste, de vérifier qu'on arrive approximativement au même résultat en calculant directement la résistance du nouveau matériel. Par exemple, la résistance de la voiture Zipernowski comprend la résistance au roulement et frottement r, qu'on peut évaluer à 2 kg. par tonne, et la résistance de l'air sur une surface de front de 13 m² qui, en admettant que la forme de l'avant-bec réduise de moitié l'effet de l'air, est équivalente à la surface de 6,50 m² admise pour le calcul du tableau de la page 440 ; à la vitesse de 200 km : h., on trouve ainsi un coefficient de traction de $2 + \frac{1605}{55} =$ 32 kg : t., au lieu de 35 que nous admettons ici ; la différence de 10 p. 100 peut être négligée.

Dans les matériels mentionnés ci-dessus, où les moteurs pèsent 12 à 20 t. et donnent des puissances de 600 à 800 chevaux sur une voiture de 55 à 60 t., le poids spécifique p ne descend pas au-dessous de 75 à 100 kg. par cheval, et par suite les vitesses dépasseraient difficilement 150 km : h. si l'on n'augmentait pas la puissance des moteurs relativement au poids des voitures. En descendant à 50 kg. par cheval (dont 20 à 25 pour les moteurs seuls), on pourrait atteindre des vitesses de 175 à 200 km : h [1].

On voit que la supériorité du matériel électrique résulte du fait que la voiture automobile avec ses voyageurs et ses moteurs ne présente qu'un poids spécifique au plus égal à celui d'une locomotive à vapeur se remorquant elle-même sans effet utile.

Il convient de remarquer que l'obtention et la conservation de ces grandes vitesses présenteront toujours de grosses difficultés accessoires : d'une part, la puissance supplémentaire considérable qu'il faudra développer pour la mise en vitesse des trains et qui nécessitera sans doute aux stations l'emploi de locomotives de renfort destinées à pousser ces trains, comme cela se pratique déjà en Angleterre ; d'autre part, l'accroissement de vitesse et de puissance très considérable qui serait nécessaire pour rattraper un retard. Soient V la vitesse moyenne et V' la vitesse accélérée ; le parcours l nécessaire pour regagner une minute perdue est donné par la relation

$$\frac{l}{V} - \frac{l}{V'} = \frac{1}{60} \text{ heure.}$$

Cette formule peut se traduire graphiquement par un diagramme (fig. 818) dû à Ivatt.

Les chiffres des losanges représentent les distances l à franchir en kilomètres ; celui qui est compris dans l'angle inférieur du V formé par deux quelconques des obliques indique la distance sur laquelle une minute sera rattrapée ou perdue par un accroissement ou une diminution de vitesse égale à la différence entre les vitesses marquées aux extrémités supérieures des mêmes obliques. Ces vitesses sont exprimées en km : h. ou inversement en minutes par km.

Par exemple, un train marchant à 100 km : h. qui a perdu une minute doit, pour la rattraper, marcher à la vitesse de 120 km : h. pendant 10 km. ou à 110 km : h. pendant 18,2 km., sans parler de la période d'accélération dont il a besoin pour atteindre cette vitesse supérieure.

On voit qu'il faut toujours laisser une marge importante entre la vitesse théorique et la vitesse pratiquement réalisable ; c'est pourquoi on doit considérer comme un but déjà très élevé le chiffre de 150 km : h. pour un service à grande vitesse (voir p. 8).

Les considérations que nous venons de développer n'ont pour but que de préciser et de compléter, au point de vue de la traction proprement dite, les indications générales données plus haut (t. I, p. 497, et t. II, p. 8) et nous ne reviendrons pas ici sur les autres conditions d'application et l'avenir de la

[1] Il va sans dire que la traction par accumulateurs, étant donné que les batteries complètes pèsent au moins 200 kg. par cheval, est ici hors de question.

traction électrique à grande vitesse, qui ont été traitées avec détails au chapitre VIII.

Limitation des rampes dans la traction à faible vitesse. — Dans la traction à faible vitesse, les moteurs gearless et à simple réduction ne travaillant pas à leur puissance maxima possible, leur poids spécifique doit être rapporté, comme on l'a vu au chapitre V (t. I, p. 189), à l'*effort* qu'ils produisent à la jante.

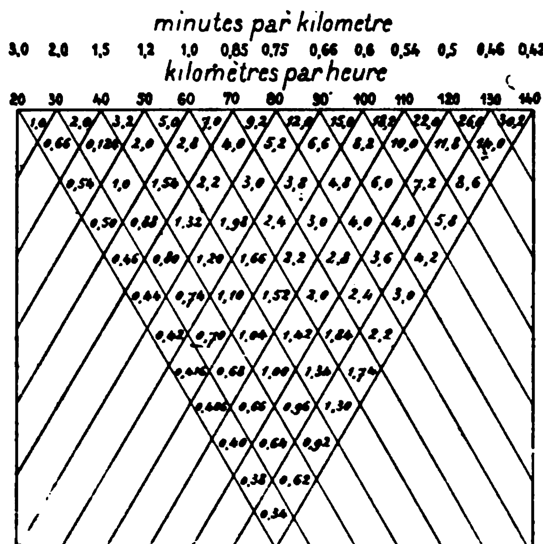


Fig. 818. — Diagramme d'Ivatt.

Les équations précédentes doivent alors être remplacées par d'autres analogues, rapportées aux *efforts spécifiques* à la jante.

Soit F l'effort moteur total de l'équipement ;

— f le rapport de l'effort résistant au poids du train ;

— q le poids spécifique de l'organe moteur rapporté à l'unité d'effort moteur à la jante.

On aura, en exprimant les poids et les efforts en kilogrammes:

$$P = qf(P + Q),$$

d'où

$$P = \frac{Q}{\frac{1}{qf} - 1},$$

$$F = \frac{P}{q} = \frac{Q}{\frac{1}{f} - q}.$$

$$f = \rho + \frac{i}{\sqrt{1 + i^2}} + \frac{Z}{P} + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt},$$

$$\tau = 1 - qf = 1 - q\left(\rho + \frac{i}{\sqrt{1 + i^2}} + \frac{Z}{P} + \frac{1}{g}\frac{dV}{dt}\right).$$

Le terme $\frac{1}{g}\frac{dV}{dt}$ est en pratique de 40 à 50 kg. par tonne, mais il peut s'abaisser à la moitié de cette valeur sur les rampes.

Sur les tramways et les lignes à crémaillère[1], $\rho + \frac{i}{\sqrt{1+i^2}}$ est assez élevé et la vitesse assez faible pour que les variations du terme $\frac{Z}{P}$ relatif à la résistance atmosphérique puissent être négligées. Nous poserons donc $\rho + \frac{Z}{P} = \beta$, en supposant β constant.

Les équations précédentes déterminent les conditions qui, indépendamment de l'adhérence étudiée plus haut, limitent la traction en rampe et l'accélération au démarrage. La limite théorique d'inclinaison qu'impose le poids mort pour réaliser un rendement de traction η est donnée par l'équation

$$\beta + \frac{i}{\sqrt{1+i^2}} = \frac{1-\eta}{q} = \frac{P}{q(P+Q)}.$$

Dans le cas de la traction par locomotive, la limite pratique correspond au rendement minimum qu'on peut admettre, soit en général 0,50 ; d'où

$$\beta + \frac{i}{\sqrt{1+i^2}} = \frac{1}{2q}.$$

La locomotive seule pourrait franchir une rampe plus élevée $\beta + \frac{i}{\sqrt{1+i^2}} = \frac{1}{q}$, mais sans produire aucun effet utile.

Dans le cas d'une automobile, les conditions de construction interviennent. On peut estimer, en général, à 30 ou 40 p. 100 au plus le rapport maximum du poids de l'organe moteur au poids total de l'automobile. D'où

$$\beta + \frac{i}{\sqrt{1+i^2}} = \frac{0{,}30 \text{ à } 0{,}40}{q_1},$$

q_1 étant le poids spécifique des moteurs seuls.

Pour les tramways, le poids des moteurs à 500 volts est de 2 à 3 kg. par kilogramme d'effort à la jante (t. I, p. 189), et la dépense d'énergie correspondante aux bornes de 40 à 50 watts ($\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{12}$ d'ampère) par kilogramme d'effort.

Avec des voitures automobiles alimentées extérieurement, il n'y a donc, pour ainsi dire, d'autre limite que l'adhérence ou l'inclinaison dangereuse de la crémaillère si l'on recourt à l'adhérence artificielle qu'elle procure.

Il n'en est pas de même dans la traction par accumulateurs, parce que le poids mort énorme de ceux-ci fait bien vite sentir son influence. Dans les équations précédentes, il faut en effet ajouter au poids spécifique q des moteurs seuls

[1] C'est en vue de cette application aux fortes rampes que nous prenons ici l'expression exacte $\frac{i}{\sqrt{1+i^2}}$ au lieu de i.

celui de la batterie, que nous appellerons q_2, et au poids P_1 le poids total de batterie P_2 ; les équations deviennent ainsi :

$$P_1 + P_2 = \frac{Q}{\frac{1}{f(q_1 + q_2)} - 1},$$

$$F = \frac{P_1 + P_2}{q_1 + q_2} = \frac{Q}{\frac{1}{f} - (q_1 + q_2)},$$

$$\eta = 1 - f(q_1 + q_2),$$

f conservant la même expression que plus haut (p. 512).

Le poids spécifique q_2 peut s'évaluer d'après le débit spécifique de la batterie rapporté au poids total des accumulateurs, en le comparant à l'effort des moteurs par ampère[1]. Pratiquement, on peut compter 4 à 6 kg. de poids par kilogramme d'effort forcé.

On arrive ainsi à un poids spécifique total $q_1 + q_2 = 6$ à 9 kg. par kg. d'effort à la jante avec marche à couplage fixe[2]. D'autre part, on peut évaluer le poids moteur à 40 p. 100 du poids total P + Q. C'est ainsi que l'équipement moteur total est de 4,5 à 5,5 t. pour une automobile à 2 moteurs capables de développer 600 à 800 kg. d'effort total à la jante en régime forcé sur une déclivité passagère et pesant 12 à 14 t. en charge, tout compris[3].

En admettant un coefficient de traction $\beta = 10$ kg. par tonne sur rails Broca, la déclivité limite sera donnée par la relation

$$0{,}010 + \frac{i}{\sqrt{1 + i^2}} = \frac{0{,}40}{6 \text{ à } 9} = 0{,}0666 \text{ à } 0{,}0444,$$

d'où

$$i_{max} = 0{,}056 \text{ à } 0{,}034.$$

[1] En prenant, par exemple, 260 éléments d'accumulateurs modernes, type Planté à grande surface, qui peuvent débiter *momentanément* 10 à 12 amp. par kilogramme de plaques, soit 6 à 8 amp. par kilogramme de poids total (1,4 fois plus grand), on trouverait un poids de batterie de $\frac{260}{10 \times 6}$ à $\frac{260}{10 \times 8}$ soit 4,5 à 2,8 kg. par kilogramme d'effort temporaire en rampe. Ce sont des minima sur un tramway.

[2] Quand on emploie la régulation par couplage variable, on peut doubler ou quadrupler momentanément les valeurs q_1 et q_2 en mettant soit les moteurs en série, soit deux demi-batteries d'accumulateurs en parallèle; mais on réduit ainsi la vitesse à la moitié ou au quart si l'on fait à la fois ces changements. On gagne donc sur la pente limite au détriment de la vitesse.

[3] Voir par exemple (t. I, p. 380) les automobiles des lignes de Courbevoie et Levallois de la Cie des tramways de Paris et du département de la Seine, qui pèsent :

Caisse (52 places), à vide	3 780 kg.
Truck	2 370 —
Moteurs	1 600 —
Batterie	3 600 —
Total à vide	11 350 kg.
— en charge	14 000 kg.

En fait, par suite de la nécessité du démarrage, qui ne peut exiger moins de 2,5 kg. par tonne, les batteries, surtout celles à oxyde rapporté, ne permettent d'aborder que très exceptionnellement des rampes de 3 à 4 p. 100; par exemple, sur la ligne de Paris à Saint-Denis, on rencontre des rampes de 0,038; encore faut-il ajouter que sur les anciennes voitures, on met les batteries en parallèle par groupes de quatre et qu'on monte ces rampes à une vitesse extrêmement réduite.

Dans tout notre raisonnement, nous avons supposé qu'il s'agissait de rampes accidentelles; les limites seraient encore abaissées s'il s'agissait d'une déclivité constante sur tout un parcours. En effet, en régime permanent, on ne pourrait admettre que des chiffres de débit environ moitié plus faibles, c'est-à-dire des valeurs doubles pour q_1 et q_2. On en déduirait

$$i = 0{,}023 \text{ à } 0{,}012.$$

En pratique, on peut donc considérer 0,020 comme une limite de la déclivité prolongée admissible.

Ces chiffres pourront être modifiés naturellement en même temps que q_1 et q_2 si l'on emploie des moteurs et des accumulateurs plus légers ou plus lourds.

Enfin, si l'on introduit entre moteurs et essieux des transmissions à grande réduction comme celle des électromobiles routières, les moteurs pouvant tourner à pleine vitesse, leur poids devient proportionnel à leur puissance comme dans le cas de la traction à grande vitesse. On peut alors appliquer les équations de la page 507. S'il s'agit d'électromobiles à accumulateurs, on pourra admettre un poids de 25 à 30 kg. par cheval pour les moteurs et 200 kg. par cheval pour les accumulateurs et accessoires (150 kg. de plaques au régime de 2,5 à 3 ampères par kilogramme)[1].

Proportion du poids d'accumulateurs qui assure l'utilisation maxima d'un matériel. — Dans ce qui précède, nous avons supposé le poids des moteurs et des accumulateurs proportionnel à la puissance demandée; c'est en effet en général, comme on le verra plus loin (ch. XIV, § 4), la puissance à débiter plutôt que la capacité qui détermine le poids d'une batterie.

Supposons maintenant, au contraire, qu'on puisse réaliser des transmissions à réduction assez grande, des démarrages assez rares, des efforts maxima assez faibles et des débits spécifiques d'accumulateurs assez élevés pour que le poids de la batterie dépende seulement du travail total à fournir[2], c'est-à-dire du produit du temps du parcours par la puissance moyenne débitée Π.

En appelant p'' le poids de la batterie par *unité de travail* emmagasiné, le

[1] Pour ce sujet spécial, nous renvoyons à la très complète et très intéressante étude de M. E. Hospitalier, présentée à la *Société des Électriciens* le 5 mai 1897.

[2] C'est le cas des automobiles sur route ou des automobiles postales de chemins de fer (voir p. 596), dont les démarrages sont peu nombreux et lents et pour lesquelles la durée des accumulateurs est sacrifiée à l'obtention d'une grande capacité et de régimes de décharge très poussés (accumulateurs Fulmen, par exemple).

poids d'accumulateurs P″ nécessaire pour remorquer une charge utile Q et le poids mort P croissent avec le parcours qu'on veut effectuer,

$$P'' = (P + Q)\ 3{,}6\ V\ (p''\ T)\ (\beta + i),$$

et le rendement est d'autant moins bon qu'on désire aller plus loin.

Mais on peut considérer le problème à un point de vue différent et se demander quelle est la proportion entre le poids d'accumulateurs et le poids total la plus favorable pour utiliser le mieux possible un moteur de puissance Π. Cette puissance étant donnée, le poids du moteur et le poids total qu'il peut remorquer sont naturellement constants. On a donc, en appelant Q le poids de la voiture non équipée, P′ celui du moteur et P″ celui de la batterie,

$$P = P' + P'' = P' + p''T\ \Pi.$$

Le rendement est

$$\eta = \frac{Q}{P + Q} = 1 - \frac{P' + P''}{P + Q}.$$

Le travail utile est proportionnel à

$$QT = (Q + P'')\ T - p''T^2\Pi,$$

dont le maximum a lieu quand

$$Q + P'' = 2p''T\ \Pi = 2P'',$$

c'est-à-dire quand le poids de la batterie est égal au poids utile Q. Un constructeur d'automobiles à accumulateurs, qui cherche à réaliser le plus grand effet utile avec chacun des moteurs qu'il construit, sera donc disposé à se rapprocher de cette condition dans l'établissement de ses divers types. Mais le rendement correspondant à ce maximum est

$$\frac{Q}{2Q + P'},$$

c'est-à-dire inférieur à 0,50. L'acheteur qui doit employer l'automobile pourra donc être amené, au contraire, à rechercher plutôt un rendement meilleur au prix d'une dépense d'achat plus élevée. Ici encore, comme dans beaucoup de questions similaires, les conditions de puissance et de rendement conduisent à des desiderata plus ou moins opposés.

IV. — Démarrage et accélération

On a vu au § 1 comment on calcule l'effort de traction supplémentaire nécessaire à l'accélération. Il nous reste à étudier les circonstances de production de cet effort et les conditions à remplir pour le réaliser de la façon la plus convenable et la plus économique.

Pour étudier ce problème, un des plus importants de la traction électrique à bien des points de vue, nous avons d'abord à résoudre les trois questions suivantes :

1° Combien de temps faudra-t-il pour amener la voiture du repos à la vitesse fixée par les conditions d'exploitation ?

2° Quel sera le courant maximum requis pendant la période d'accélération? Cette valeur est importante à connaître à la fois pour la construction du moteur et pour le choix de la puissance des unités génératrices et de la section des conducteurs de distribution du courant.

3° Quelle sera la dépense totale d'énergie nécessaire pour chaque mise en vitesse dans des conditions données? Cette dépense joue un rôle important dans les frais de traction des lignes à arrêts fréquents.

Ces trois questions étant plus ou moins connexes peuvent être traitées à la fois ; l'étude théorique complète que nous en ferons d'abord nous servira de point de départ pour des applications variées et pour des conclusions pratiques relatives à la manœuvre des régulateurs et au choix du matériel.

Influence de l'inertie des roues et de l'armature des moteurs. — La puissance vive d'un véhicule de poids P, animé de la vitesse V, a, comme on le sait, pour expression $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2$. Mais cette puissance vive correspondant au déplacement rectiligne doit être augmentée de l'effet de l'inertie des parties tournantes, essieux, roues et induits des moteurs.

Appelons : p le poids d'un essieu monté et de la roue d'engrenages calée sur cet essieu (dans les équipements à simple réduction),

ω la vitesse angulaire de cet ensemble,

γ son rayon de giration,

r le rayon des roues,

p' le poids d'une armature avec son pignon,

γ' le rayon de giration correspondant,

m le rapport du nombre des dents de la roue à celui du pignon,

n le nombre des essieux du véhicule,

n' le nombre des moteurs de ce véhicule.

La puissance vive complète du véhicule est

$$\frac{1}{2g}\left[P V^2 + np\gamma^2\omega^2 + n'p'\gamma'^2 m^2 \omega^2\right]$$
$$= \frac{V^2}{2g}\left[P + n\,\frac{p\gamma^2}{r^2} + n'\,\frac{p' m^2 \gamma'^2}{r^2}\right].$$

On peut donc faire abstraction des parties tournantes en attribuant au véhicule un poids fictif plus grand

$$P' = P\left[1 + n\,\frac{p}{P}\,\frac{\gamma^2}{r^2} + n'\,\frac{p'}{P}\,\frac{m^2\gamma'^2}{r^2}\right]. \qquad (100)$$

Le rapport $\frac{\gamma^2}{r^2}$ a comme valeur moyenne pratique 0,544, qu'on peut arrondir à 0,50. Sur les voitures d'attelage de tramways et les véhicules de chemins de fer, on peut admettre que la moyenne de $\frac{np}{P}$ diffère peu de 0,10 à 0,12, en sorte qu'on peut poser pour chaque essieu

$$\frac{p}{P}\,\frac{\gamma^2}{r^2} = 0{,}025 \text{ à } 0{,}030,$$

suivant qu'il s'agit d'une grande ou d'une petite voiture. Quant au terme relatif aux armatures des moteurs, il est beaucoup plus important et dépend trop des circonstances pour être évalué d'une façon générale a priori.

Pour donner une idée de la valeur pratique de la parenthèse, nous prendrons un exemple. Soit une automobile de 7,5 t. (9 t. en charge) à 2 moteurs type Siemens et Halske de 20 chev., dont les armatures ont un rayon de giration d'environ 0,125 m. et un poids de 270 kg., soit 300 kg. en chiffres ronds avec le pignon ; le coefficient de réduction est de 5,5 ; soient 0,75 m. le diamètre des roues et 500 kg. le poids d'un essieu monté avec sa roue d'engrenages. On a :

$$\frac{\gamma^2}{r^2} = 0{,}50, \qquad \frac{\gamma'^2}{r^2} = \left(\frac{0{,}25}{0{,}75}\right)^2 = \frac{1}{9}, \qquad \frac{p}{P} = \frac{0{,}5}{9} = 0{,}056, \qquad \frac{p'}{P} = \frac{0{,}3}{9} = \frac{1}{30}.$$

d'où

$$P' = P\left[1 + 2 \times 0{,}5 \times 0{,}056 + \frac{2}{30}\,\frac{(5{,}5)^2}{9}\right] = (1 + 0{,}056 + 0{,}22)\,P = 1{,}28\,P.$$

On voit que ces effets d'inertie sont loin d'être négligeables et qu'il y a lieu d'en tenir compte dans les questions de démarrage.

Les bons constructeurs s'inspirent avec raison de cette considération pour réduire autant que possible le diamètre et le poids de leurs armatures.

On admettra dans tout ce qui suit que le poids indiqué pour chaque véhicule dans le calcul de l'inertie est le poids majoré d'après les indications précédentes; nous lui donnerons, pour éviter toute confusion, le nom de *poids d'inertie*.

Etude du régime varié pendant la mise en marche. — Méthode générale. — Pendant la mise en marche d'un véhicule moteur, le courant, la vitesse et le couple moteur varient d'une manière progressive jusqu'à ce que la vitesse reste constante, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'on ait atteint le régime permanent ou, tout au moins, qu'on s'en soit approché à 1/100 près, par exemple, car, théoriquement, ce régime ne serait atteint qu'au bout d'un temps infini.

Appelons : V la vitesse de régime, v la vitesse variable;

P le poids réel et P′ le poids d'inertie du véhicule de tête ;

Q et Q′ les poids correspondants des véhicules suivants, s'il y a lieu ;

β, β' les coefficients de traction à la vitesse V applicables *en palier* à ces deux parties du train respectivement ;

i l'inclinaison en rampe du profil;

$\mathcal{R}$, la résistance totale du train.

Suivant la disposition des résistances et le groupement des moteurs, qui dépendent du système de régulation adopté, la succession des régimes variables que réalisera le mécanicien par la manœuvre du régulateur pourra être fort différente. Pour chaque groupement et pour chaque valeur donnée aux résistances intercalées en série ou en shunt, comme on l'a vu au chapitre XI, le courant pris par les moteurs et l'effort de traction qui en résulte sont des fonctions de la vitesse, données par des courbes analogues à celles de la figure 819 (voir p. 471) et qu'on peut représenter algébriquement par des expressions de la forme :

$$I = \varphi(v),$$
$$F = f(v).$$

Les coefficients de traction totaux β et β' sont également des fonctions de la vitesse :

$$\beta = \chi\,(v),$$
$$\beta' = \chi'\,(v).$$

L'équation des forces vives appliquée au véhicule ou au train est, dans la position du régulateur considérée,

$$\frac{P' + Q'}{g}\,dv = [F - P\,(\beta + i) - Q\,(\beta' + i)]\,dt = (F - \mathfrak{R})\,dt.$$

d'où

$$dt = \frac{P' + Q'}{g}\int_0^V \frac{dv}{F - \mathfrak{R}}. \qquad (101)$$

D'après les expressions de F et de $\mathfrak{R}$, le dénominateur de la quantité soumise à l'intégration est une fonction de v. On peut obtenir cette intégrale graphiquement par simple quadrature. Construisons, en effet, par points sur les valeurs de v portées en abscisses la courbe ayant pour ordonnées les valeurs de

$$y = \frac{1}{F - \mathfrak{R}}.$$

L'intégrale devient alors

$$\int_0^V y\,dv.$$

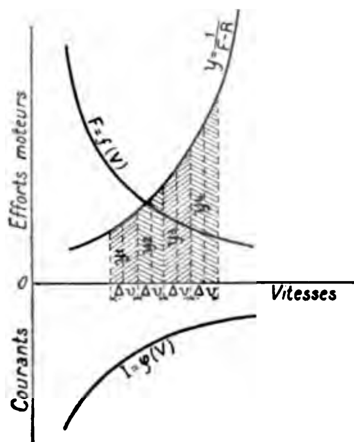


Fig. 819. — Principe du calcul des courbes d'accélération.

On peut donc la calculer en planimétrant la courbe y ou plus simplement par la méthode d'intégration bien connue de Simpson.

Celle-ci remplace l'intégration par une sommation de différences finies, qu'on peut écrire

$$t = \sum_0^t \Delta t = \frac{P' + Q'}{g}\sum_0^V \frac{\Delta v}{F - \mathfrak{R}} = D\sum_0^V \frac{\Delta v}{F - \mathfrak{R}}, \qquad (102)$$

en appelant D la constante $\frac{P' + Q'}{g}$.

Cela revient à tracer une série de verticales équidistantes divisant l'aire comprise entre l'axe des abscisses et la courbe y en

une série de tranches verticales minces de largeur Δv, qu'on peut assimiler à des trapèzes dont les surfaces s_1, s_2, s_3, s_4 mesurent les accroissements de temps correspondants,

$$\Delta t_1 = s_1 = \mathrm{D}\left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right) \times \Delta v = \Delta v \left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{F} - \mathfrak{R}}\right)_{\text{moyen}},$$

$$\Delta t_2 = s_2 = \mathrm{D}\left(\frac{y_2 + y_3}{2}\right) \times \Delta v = \Delta v \left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{F} - \mathfrak{R}}\right)_{\text{moyen}}, \text{ etc.,}$$

et il suffit ensuite de porter sur les ordonnées médianes y de ces trapèzes les ordonnées cumulées

$$t_1 = s_1,$$
$$t_2 = s_1 + s_2, \text{ etc.}$$

On voit par ces expressions qu'au lieu de calculer la valeur moyenne $\frac{1}{\mathrm{F} - \mathfrak{R}}$ pour chaque trapèze en prenant la demi-somme des valeurs extrêmes de y on obtient sensiblement le même résultat, plus simplement, en prenant sur l'épure des données les valeurs F et $\mathfrak{R}$ correspondant à la vitesse moyenne $\mathrm{V} + \frac{\Delta v}{2}$. Le tableau de la page 536 montre comment on doit disposer les calculs dans ce cas, en se dispensant de tracer la courbe y, que nous avons considérée seulement pour plus de rigueur dans le raisonnement.

On choisit l'échelle des ordonnées de façon que la courbe obtenue en joignant ces points reste contenue dans l'épure.

On obtient ainsi la loi qui relie le temps à la vitesse pour la position du régulateur considérée. En opérant de même pour les autres suivant l'ordre fixé par la succession des crans de la manette, on obtient une série de courbes indiquant la durée nécessaire pour atteindre la vitesse de régime. Pour chaque valeur de v, la courbe $\mathrm{I} = \varphi(v)$ donne l'intensité du courant et permet de construire ensuite la courbe de variation de I en fonction du temps, ce qui complète la solution du problème.

Un exemple fera mieux comprendre cette méthode de calcul. Supposons qu'il s'agisse d'étudier la mise en vitesse sur une rampe de 6 mm. par mètre d'un train léger de 40 t. formé de 2 voitures à bogies et actionné par 4 moteurs de 50 chev. Soit 50 t. le poids corrigé. Sur la rampe donnée, la résistance totale à la traction, calculée comme plus haut (p. 472), est représentée en fonction de la

vitesse par la courbe MLN (fig. 820) ; les courbes caractéristiques des efforts moteurs et des courants en fonction de la vitesse sont portées sur la même épure. Le régulateur est établi de façon à réaliser les combinaisons successives suivantes correspondant aux numéros des courbes :

I. Les 4 moteurs en série, avec résistance de 1,6 ohm en série ;

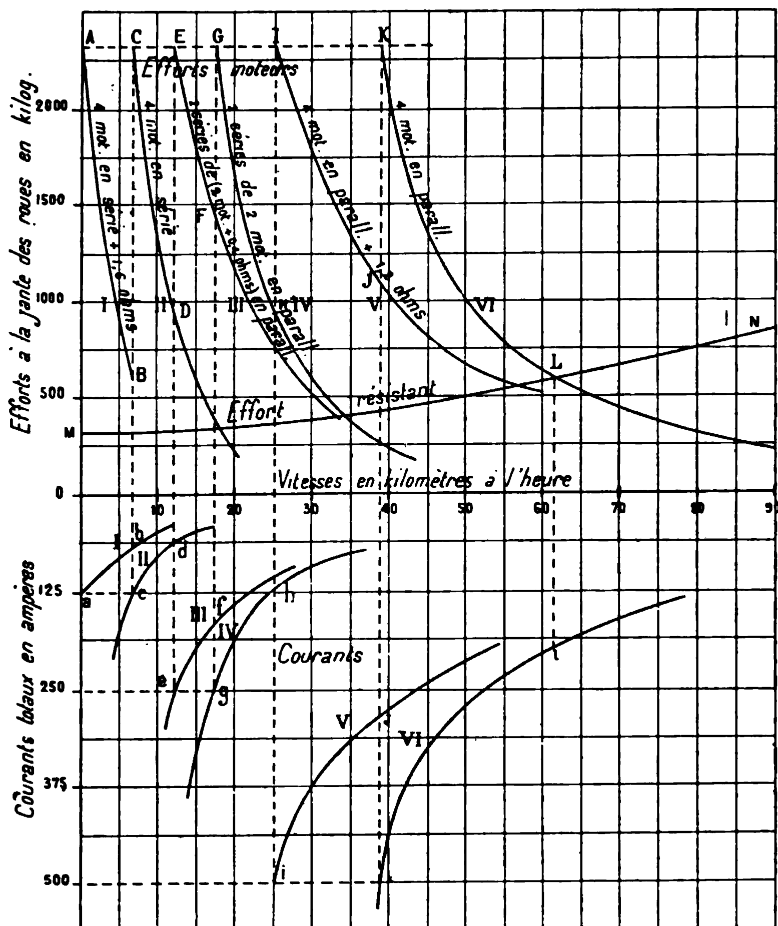


Fig. 820. — Exemple de calcul d'accélération d'un train léger de 40 t. équipé avec 4 moteurs de 50 chevaux. — Épure des données.

II. Même combinaison sans résistance ;

III. Moteurs groupés par 2 en série, les 2 groupes étant couplés en parallèles avec résistance de 0,4 ohm en série dans chacun ;

IV. Même combinaison sans résistance ;

V. Les 4 moteurs en parallèle, avec résistance de 1,2 ohm en série sur le courant total ;

VI. Même combinaison sans résistance.

Le courant maximum admis pour chaque moteur est de 125 amp., correspondant à un effort moteur total de 2 350 kg. à la jante des roues. Dans ces conditions, le courant total maximum atteindra 125 amp. dans les combinaisons I et II, 250 dans les combinaisons III et IV, et 500 dans les combinaisons V et VI.

Les résistances ajoutées ont été choisies par tâtonnements[1], de manière à atteindre ce courant maximum sans le dépasser et, par conséquent, à quitter chaque courbe à la vitesse où la courbe suivante réalise précisément cette intensité.

On prend pour chaque courbe d'effort les différences $(F - \mathfrak{R})$ entre ses ordonnées et celles de la courbe des résistances totales MLN; en prenant l'inverse, on obtient les 5 courbes $\frac{1}{F - \mathfrak{R}}$ de la figure 821, où F et $\mathfrak{R}$ sont exprimés en kg. et les ordonnées en $\frac{1}{1\,000}$ kg. Il ne reste plus ensuite qu'à les planimétrer comme nous venons de l'expliquer. Nous avons fait ce travail en calculant les accroissements de temps correspondant à de petits trapèzes ayant pour base un accroissement de vitesse $\Delta v = 1$ km : h. $=$ 0,277 m. par seconde. On a, par exemple :

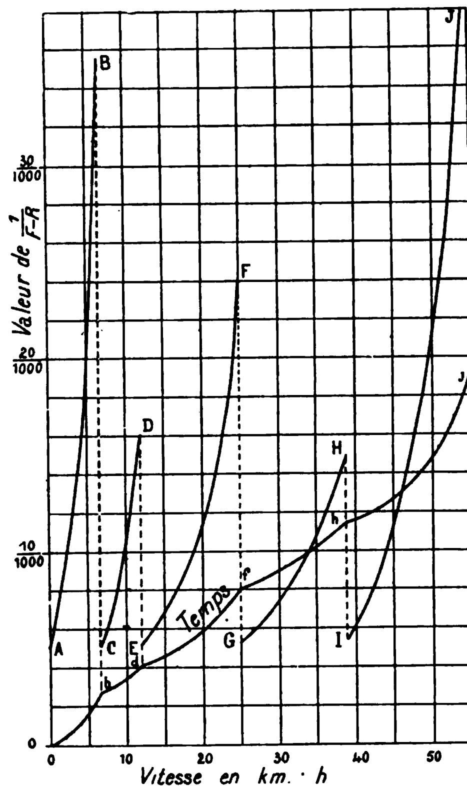


Fig. 821. — Suite de l'exemple précédent.
Courbes de $\frac{1}{F - \mathfrak{R}}$.

$$1^{er}\text{ trapèze, } \Delta_1 t = \frac{P'}{g} \Delta v \frac{1}{F - \mathfrak{R}} = \frac{50\,000}{9{,}81} \times 0{,}277 \times 0{,}00058$$

$= 1412 \times 0{,}00058 = 0{,}82$ seconde; total $t_1 =$ 0,82 seconde

2e	—	$\Delta_2 t = 1412 \times 0{,}00076 = 1{,}07$	—	— $t_2 =$ 1,89	—
3e	—	$\Delta_3 t = 1412 \times 0{,}00100 = 1{,}41$	—	— $t_3 =$ 3,30	—
4e	—	$\Delta_4 t = 1412 \times 0{,}00122 = 1{,}72$	—	— $t_4 =$ 5,02	—
5e	—	$\Delta_5 t = 1412 \times 0{,}00156 = 2{,}20$	—	— $t_5 =$ 7,22	—
6e	—	$\Delta_6 t = 1412 \times 0{,}00216 = 3{,}05$	—	— $t_6 =$ 10,27	—
7e	—	$\Delta_7 t = 1412 \times 0{,}00300 = 4{,}24$	—	— $t_7 =$ 14,51	—

et ainsi de suite.

[1] C'est-à-dire en essayant différentes courbes intercalaires.

On obtient ainsi par points les ordonnées de la courbe des temps tracée à une échelle 5 000 fois plus grande que celle des courbes (F — $\mathfrak{R}$). En la reproduisant à une autre échelle sur la figure 822, où les axes de coordonnées sont intervertis, on obtient finalement la courbe des vitesses en fonction des temps OB*dfh*K. Enfin, il suffit de lire sur l'épure des régimes (fig. 820) les intensités correspondant aux diverses vitesses pour en déduire par points les courbes d'intensité de courant en fonction du temps ABCDEFGHIJ. Le problème est ainsi complètement résolu pour le cas considéré.

En recommençant la même série d'opérations pour différentes courbes de résistance, correspondant à d'autres rampes, on obtiendrait une connaissance

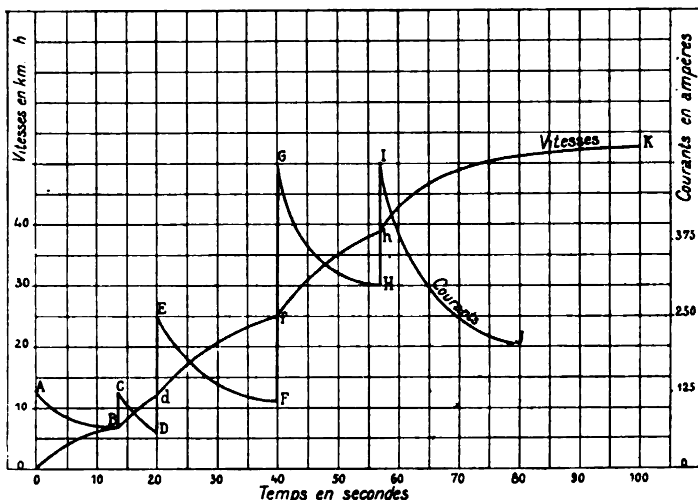


Fig. 822. — Suite de l'exemple précédent. — Courbes finales de vitesse et de courant sous 500 volts, en fonction du temps.

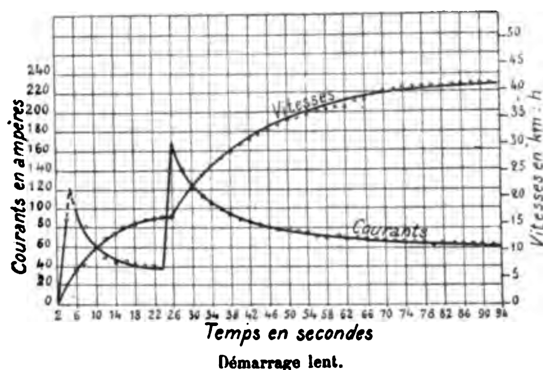
parfaite des conditions de démarrage du train sur toutes les déclivités ; nous reviendrons plus loin sur ce sujet. Enfin, la dépense totale d'énergie se calcule sur l'épure en planimétrant la courbe des courants ; en multipliant le chiffre d'amp.-sec. par $\frac{U}{3\,600}$ (U étant la tension du réseau en volts) on obtient la consommation d'énergie en watts-heures.

Dans l'exemple choisi, on trouve 5,45 amp.-h. ou 2750 w.-h. dépensés pendant les 90 secondes que dure pratiquement la mise en vitesse, avec un parcours de 0,750 km., soit 91 w.-h. par t. et par km.

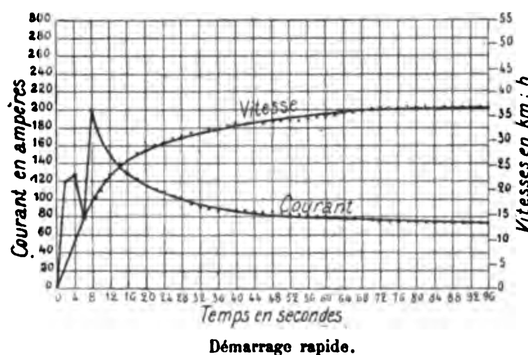
Les courbes ainsi déterminées présentent bien l'allure de celles qu'on relève expérimentalement, à la seule différence que les variations brusques du courant peuvent être un peu retardées en pratique par l'effet de la self-induction des moteurs. Par exemple, la figure 823 donne deux spécimens de courbes déduites des expé-

riences de MM. Curtiss et Pond, citées plus haut, et relatives à une automobile de 15 t. à 4 moteurs G. E. 800 démarrant en palier (lectures faites toutes les 2 secondes).

Dans le cas où l'on emploie la régulation par simple rhéostat, l'allure générale de la variation du courant est la même que dans la première phase de la figure précédente. Toutes les fois qu'on



Démarrage lent.



Démarrage rapide.

Fig. 823. — Courbes expérimentales de démarrage d'une automobile électrique réglée par la méthode série-parallèle.

fait varier la résistance du rhéostat en passant d'une touche sur l'autre, il se produit une brusque montée du courant. La figure 824 donne un exemple de courbes ainsi relevées par M. L. H. Parker dans trois démarrages avec rhéostat effectués par l'une des locomotives électriques du Baltimore and Ohio R.R. avec ses 4 moteurs couplés invariablement en série; le poids total du train était de près de 900 t. et le courant consommé a presque atteint 2 000 amp. au moment du maximum. La courbe du milieu se rap-

porte à une manœuvre très douce du rhéostat; celle de droite présente au contraire d'assez forts à-coups dans l'intensité du courant.

On remarquera sur les diagrammes expérimentaux ci-dessous que la courbe représentative du courant, dans ses variations brusques, présente des tronçons non pas verticaux, comme l'indique la théorie précédente, mais légèrement inclinés ; ce fait, qui est général, provient de la self-induction des moteurs, qui retarde les variations du courant. On pourrait en tenir compte dans le

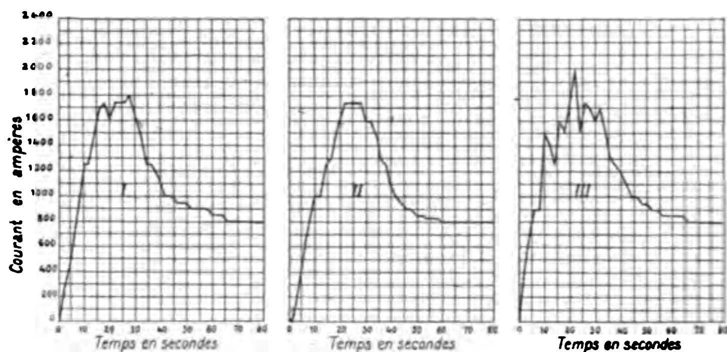


Fig. 824. — Courbes expérimentales de démarrage d'une des locomotives du Baltimore and Ohio R.R. remorquant un train de 875 t. sur une rampe de 8 mm. par mètre.

calcul ; mais l'effet perturbateur est assez peu important pour que cette complication soit sans utilité.

On verra encore au § 3 plusieurs spécimens de courbes relevées sur des métropolitains, qui sont analogues à l'un ou l'autre des deux types précédents.

La méthode rigoureuse et suffisamment rapide que nous avons exposée peut être recommandée dans tous les cas où l'étude complète de la mise en vitesse présente de l'intérêt ; en particulier sur les lignes de chemins de fer exploitées électriquement par trains peu nombreux, où chaque usine alimente seulement 2 ou 3 trains à la fois, il y aurait grand intérêt, pour fixer la puissance des génératrices, à connaître avec précision les variations du courant pendant le démarrage. En la simplifiant comme on le verra plus loin (p. 539) cette méthode est très maniable.

Formules algébriques approchées applicables aux tramways. — Sur les tramways, où la résistance de l'air est pratiquement constante, on peut

employer une méthode approximative qui donne l'équation de la courbe d'accélération sous forme algébrique et dispense de planimétrer.

Nous supposerons, pour simplifier, qu'il s'agit d'un équipement à un seul moteur réglé par rhéostat et attaquant les deux essieux. Pour les cas plus complexes, on traiterait chaque groupement de moteurs séparément suivant la même méthode.

On peut admettre, d'après les résultats d'expériences cités plus haut, que pour toute charge, dans le cas de moteurs en dérivation, et pour toutes charges plus fortes que celles du régime normal, dans le cas de moteurs en série, le couple ou l'effort moteur (fig. 825) est simplement proportionnel au courant I, déduction faite d'une constante j_0 représentant le couple de pertes total nécessaire pour vaincre l'hystérésis et les frottements de l'arbre et des engrenages du moteur[1]. Nous avons ainsi, dans tous les cas, pour le couple moteur C l'expression donnée plus haut (p. 476)

$$C = \frac{N}{2\pi} \Phi (I - j_0), \qquad (103)$$

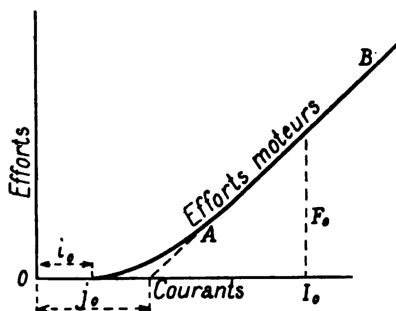


Fig. 825. — Réduction de la courbe d'effort d'un moteur en série à la forme linéaire.

Φ étant le flux inducteur correspondant au courant I considéré.

D'autre part, en appelant E la f. é. m. induite, U la tension de la ligne, r la résistance du moteur, R celle du rhéostat en série dans la position considérée du régulateur, v la vitesse correspondante, V_m la vitesse qu'il faudrait donner à la voiture[2] pour qu'avec le même champ Φ la f. é. m. E devienne égale à U, I_0 le courant qui passerait dans le cas où le moteur serait arrêté, on a

$$I = \frac{U - E}{r + R} = \frac{U}{r + R}\left(1 - \frac{v}{V_m}\right) = I_0\left(1 - \frac{v}{V_m}\right). \qquad (104)$$

D'où, en substituant,

$$C = \frac{N}{2\pi} \Phi \left[I_0 \left(1 - \frac{v}{V_m}\right) - j_0\right]$$

$$= C_0 \left[1 - \frac{v}{V_m\left(1 - \frac{j_0}{I_0}\right)}\right],$$

en appelant C_0 le couple calculé correspondant au courant I_0.

[1] Cette constante se détermine en prolongeant la partie rectiligne de la courbe jusqu'à l'axe des abscisses.

[2] On calcule V_m en mesurant sur les courbes la vitesse V correspondant à un fort courant I et la multipliant par $\frac{U}{U - rI}$. Pour les moteurs en série, on est forcé de se contenter d'une valeur moyenne plus ou moins approximative ainsi obtenue.

Les efforts à la jante des roues sont dans la même proportion

$$F = F_0 \left(1 - \frac{v}{(1 - \varepsilon) V_m}\right), \tag{105}$$

en désignant par F_0 l'effort produit à la jante par le courant I_0 et en posant pour simplifier $\frac{j_0}{I_0} = \varepsilon$.

Si l'on remplace F par cette valeur dans l'équation (101) du mouvement (p. 520) et si l'on appelle v_0 la vitesse initiale correspondant au moment où commence l'emploi de la position du régulateur considérée, cette équation devient

$$t_1 - t_0 = -\frac{P' + Q'}{gF_0} \int_{v_0}^{v} \frac{dv}{\frac{v}{V_m (1 - \varepsilon)} + \frac{P}{F_0}(\beta + i) + \frac{Q}{F_0}(\beta' + i) - 1}$$

$$= -\frac{(P' + Q') V_m (1 - \varepsilon)}{gF_0} \log \text{nép} \left[\frac{\frac{v}{(1 - \varepsilon) V_m} + \frac{P(\beta + i)}{F_0} + \frac{Q(\beta' + i)}{F_0} - 1}{\frac{v_0}{(1 - \varepsilon) V_m} + \frac{P(\beta + i)}{F_0} + \frac{Q(\beta' + i)}{F_0} - 1}\right].$$

Posons

$$\tau = \frac{P' + Q'}{gF_0} V_m (1 - \varepsilon),$$

et

$$\lambda = (1 - \varepsilon)\left[1 - \frac{P(\beta + i) + Q(\beta' + i)}{F_0}\right] = (1 - \varepsilon)\left(1 - \frac{\mathfrak{R}}{F_0}\right);$$

on peut alors écrire plus simplement

$$t_1 - t_0 = -\tau \log \text{nép}\left(\frac{v - \lambda V_m}{v_0 - \lambda V_m}\right).$$

En appelant V la vitesse de régime à atteindre ($V = \lambda V_m$), on en déduit inversement

$$V - v = (V - v_0)\, e^{-\frac{t_1 - t_0}{\tau}}.$$

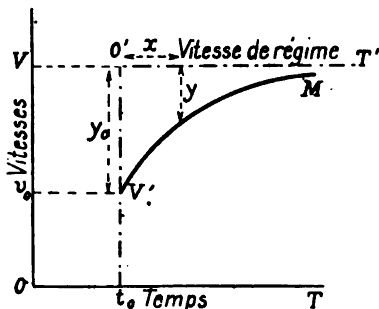


Fig. 826. — Construction de la courbe de vitesse représentée par une loi exponentielle.

Si l'on prend comme axes de coordonnées (fig. 826) d'une part l'horizontale O'T' correspondant à la vitesse de régime permanent V qu'on obtiendrait sur la touche du régulateur considérée et la verticale O'V' correspondant à l'époque t_0 où l'on commence à se servir de cette touche, cette équation revient à la suivante :

$$y = y_0\, e^{-\frac{x}{\tau}},$$

qui se traduit graphiquement par une courbe V'M asymptotique à l'axe O'T'.

Quand on passe à une nouvelle position du régulateur, on change d'axes et on construit, avec une autre valeur de R, une nouvelle courbe partant du

point limite de la précédente et asymptotique à la vitesse de régime qui correspond à cette nouvelle touche.

Pour donner un exemple d'application de cette méthode, supposons (fig. 827)

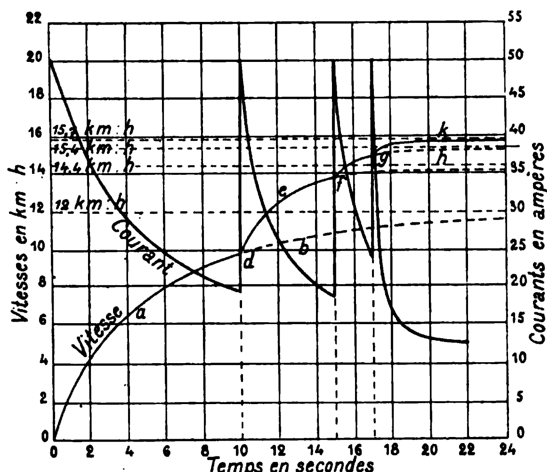


Fig. 827. — Exemple de calcul de démarrage par les exponentielles. — Voiture automobile à un moteur avec régulation par rhéostat.

qu'il s'agisse d'étudier la mise en marche sur rampe de 3 mm : m. et avec un coefficient de traction de 0,10 d'une voiture de tramway de 5 t. (poids d'inertie,

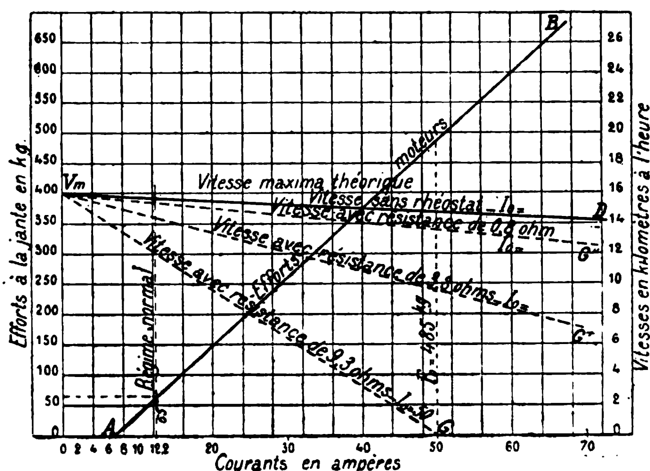


Fig. 828. — Courbes de régimes pour le calcul de l'exemple de la figure précédente.

6,5 t.) à deux essieux commandés par un même moteur shunt réglé par rhéostat en série et dont les courbes caractéristiques AB et V_mD sont données par la figure 828, avec la condition que le courant soit limité à 50 amp. et le

démarrage effectué en 20 secondes au plus. La résistance d'induit est de 0,7 ohm et la tension du réseau de 500 volts.

Nous déterminerons d'abord la résistance au démarrage de façon à ne pas dépasser le courant de 50 ampères. On doit avoir $R + 0,7 = 10$ ohms; d'où $R = 9,3$ ohms.

Le courant correspondant à l'arrêt étant de 50 amp., l'épure donne pour effort correspondant 485 kg. Cet effort, ne dépassant pas les 0,097 du poids adhérent (5 t.), est admissible; il serait exagéré dans le cas d'un seul essieu moteur.

Nous supposerons, pour simplifier, qu'on néglige ici la fraction $\varepsilon = \frac{j_0}{I_0}$ devant l'unité, sans chercher une plus grande précision.

D'autre part, l'effort de traction normal en palier étant

$$5000\,(0,010 + 0,03) = 65 \text{ kg.},$$

l'épure donne pour vitesse de régime correspondante la valeur de 12 km : h., qui ne pourra être dépassée.

On a donc, sur cette première touche :

$$\begin{aligned} P' + Q' &= 6,500 \text{ kg.}, \\ g &= 9,81 \text{ m.}, \\ V_m &= 16 \text{ km : h.}, \\ V &= 12 \text{ km : h.}, \\ F_0 &= 485 \text{ kg.} \end{aligned}$$

d'où

$$\tau = \frac{P' + Q'}{gF_0}\,\frac{V_m}{3,6} = 6,07.$$

On trouve aisément les points de la courbe rapportée à l'axe vertical origine et à l'horizontale 12 km : h. en faisant par exemple successivement :

$$t = 6,07 \text{ secondes; d'où } v = 12\left[1 - \frac{1}{2,7}\right] = 7,56 \text{ km : h.}$$

$$t = 2 \times 6,07 \quad - \quad - \quad v = 12\left[1 - \left(\frac{1}{2,7}\right)^2\right] = 10,37 \quad -$$

$$t = 3 \times 6,07 \quad - \quad - \quad v = 12\left[1 - \left(\frac{1}{2,7}\right)^3\right] = 11,40 \quad -$$

On peut donc tracer cette courbe *oabc*.

Au bout de 10 secondes, l'accélération étant déjà fort réduite, on a avantage à abaisser la résistance. Calculons-la de façon qu'à ce moment le courant maximum sur la nouvelle touche soit de 50 amp. En remarquant que le point de la courbe *oabc* correspondant indique 9,7 km : h., cela donne la condition

$$50 = \frac{U}{R + r}\left(1 - \frac{v}{V_m}\right) = \frac{500}{R + 0.7}\left(1 - \frac{9,7}{16}\right),$$

d'où

$$R = 3,3 \text{ ohms},$$

et la nouvelle courbe de vitesse OG en régime permanent est

$$V = \frac{U + rI}{U} = 16\,\frac{500 - 4I}{500}.$$

Le courant à l'arrêt serait

$$I_0 = \frac{500}{4} = 125 \text{ amp.}$$

et le couple correspondant

$$F_0 = \frac{125 - 7}{50 - 7} \times 485 = 1\,340 \text{ kg.}$$

On en déduit

$$\tau = 6{,}07 \times \frac{485}{1\,340} = 2{,}2.$$

La nouvelle courbe part du point a et son équation, rapportée à la verticale de ce point et à l'horizontale de 14,4 km : h., est

$$y = y_0\, e^{-\frac{x}{\tau}} = 4{,}7 \times 2{,}7^{-\frac{x}{2{,}2}}.$$

On trace également cette courbe par points en *def*.

Si elle pouvait atteindre la vitesse pour laquelle le moteur absorbe ses 50 amp. sans rhéostat, c'est-à-dire

$$V = 16\left(1 - \frac{0{,}7 \times 50}{500}\right) = 14{,}88 \text{ km : h.},$$

on pourrait se dispenser d'une autre touche de résistance ; mais la courbe *def* n'atteint pas cette vitesse. Force est donc d'ajouter, par exemple, au bout de 15 secondes, lorsque la vitesse est de 13,6 km : h., une dernière résistance R telle que

$$\frac{500}{R + 0{,}7}\left(1 - \frac{13{,}6}{16}\right) = 50$$

d'où

$$R = 0{,}8 \text{ ohm.}$$

A cette nouvelle touche correspondent un nouvel I_0

$$I_0 = \frac{500}{0{,}8 + 0{,}7} = 333 \text{ amp.},$$

un nouvel effort

$$F_0 = 485 \times \frac{333 - 7}{50 - 7} = 3\,677 \text{ kg.},$$

une nouvelle vitesse asymptotique V = 15,4 km : h. et enfin un nouveau $\tau = 0{,}8$.

On construira cette courbe comme les précédentes en la rapportant aux axes de 15 sec. et de 15,4 km : h.

Enfin, au bout de 17 secondes, la vitesse de 14,88 km : h. étant atteinte,

on supprime toute résistance et l'on obtient la dernière courbe *gk* asymptotique à la vitesse de régime 15,7 km : h.,

$$y = 0{,}4\ C^{-\frac{x}{0{,}37}},$$

rapportée aux axes de 17 sec. et de 15,7 km : h.

La vitesse de 15,7 km : h. peut ainsi être considérée comme pratiquement atteinte en 18 secondes, sans qu'on ait jamais dépassé 50 amp., et le rhéostat à 3 touches se trouve convenablement établi. Il va sans dire d'ailleurs qu'on pourra ajouter des touches intermédiaires si l'on veut plus de douceur dans les transitions.

Comme vérification, les vitesses aux points de changement, *dfgh*, sont les mêmes que celles trouvées au régime de 50 ampères sur les courbes de vitesse en fonction du courant.

Une fois qu'on a ainsi obtenu la courbe de vitesse en fonction du temps, la courbe d'effort en fonction du courant permet de reporter les intensités par points sur la même épure, ce qui donne la loi de variation du courant pendant l'accélération, et le problème se trouve complètement résolu, car il suffit de planimétrer cette courbe pour en déduire la quantité totale d'électricité et l'énergie dépensées.

On peut aussi remplacer ce planimétrage par un calcul direct. En effet, en reportant dans la relation initiale

$$I = I_0 \left(1 - \frac{V}{V_m}\right)$$

la valeur de v qu'on vient d'obtenir, on a, pour chaque tronçon de courbe,

$$\frac{I}{I_0} = 1 - \lambda + \lambda \left(1 - \frac{v_0}{V}\right) e^{-\frac{t - t_0}{\tau}},$$

et la dépense d'énergie correspondante s'obtient en intégrant

$$U \int_{t_0}^{t} I dt = UI_0 \left[(1 - \lambda)(t - t_0) + \lambda\tau \left(1 - \frac{v_0}{V}\right)\left(1 - e^{-\frac{t - t_0}{\tau}}\right)\right],$$

expression dont le calcul, d'après les valeurs de λ et τ données ci-dessus, ne présente aucune difficulté.

La même méthode s'applique au cas de plusieurs moteurs dans leurs différents couplages. Elle s'applique aussi au cas des moteurs en série, bien que dans ce cas elle présente une approximation moindre.

Sur les chemins de fer à grande vitesse, elle ne peut remplacer la méthode générale, eu égard à l'influence prépondérante de la vitesse sur le coefficient de traction.

Méthode de l'accélération à effort moteur constant. — On peut avantageusement, lorsqu'on ne désire pas une grande précision,

remplacer les valeurs variables du courant pendant la période où l'on emploie un rhéostat par une seule valeur moyenne [1], ce qui revient à supposer fictivement au rhéostat un nombre infini de touches. On obtient alors pendant cet intervalle de temps une accélération constante, et la variation de vitesse se fait suivant une droite au lieu d'une courbe exponentielle. Après l'enlèvement de la dernière résistance, la vitesse s'accélère jusqu'à ce que le courant s'abaisse à sa valeur de régime.

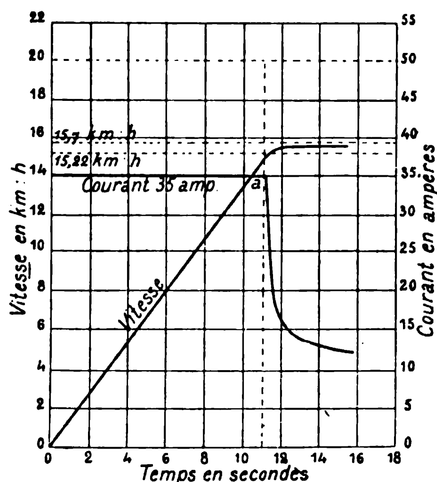


Fig. 829. — Même exemple que sur la figure 827, mais avec une accélération constante au début de la mise en vitesse.

Cette épure se rapproche d'autant plus de la réalité qu'on donne au rhéostat un plus grand nombre de touches ; en faisant varier la résistance par degrés insensibles et ayant l'œil en même temps sur un ampèremètre, on pourrait maintenir le courant sensiblement constant pendant toute l'accélération jusqu'au moment où la résistance serait totalement éliminée.

La figure 829 donne à titre d'exemple le graphique correspondant à ce mode de démarrage substitué à celui de la figure 827, dans l'hypothèse d'un courant moyen de 35 amp., ce qui correspond à une vitesse de régime de 15,22 km : h. et à un effort moteur de 320 kg.

Cette méthode s'applique également bien à un équipement comportant plusieurs moteurs avec régulation série-parallèle, à la condition de passer d'un couplage au suivant dès qu'il n'y a plus de résistance en série et de maintenir dans chaque couplage le courant constant dans chaque moteur individuellement pour ne pas dépasser l'échauffement prévu. Dans ces conditions, l'effort moteur total

[1] Ce courant moyen est naturellement plus faible que le courant maximum adopté précédemment. La valeur à prendre pour les calculs est celle qui dans la spécification détaillée que nous avons donnée plus haut (p. 520) correspond au régime d'une minute.

et par suite l'accélération restent constants jusqu'au moment où, tous les moteurs étant en parallèle, on a retiré toutes les résistances ; quant au courant total, il varie naturellement avec le couplage suivant le nombre des moteurs mis en parallèle.

A titre d'exemple, prenons une automobile de tramway de 8 t. ayant un coefficient de traction de 10 kg : t. et remorquant sur rampe de 6,15 mm : m. une voiture de 5 t. ayant un coefficient de traction de 8 kg : t ; supposons l'automobile équipée avec 2 moteurs ayant pour caractéristique la courbe de

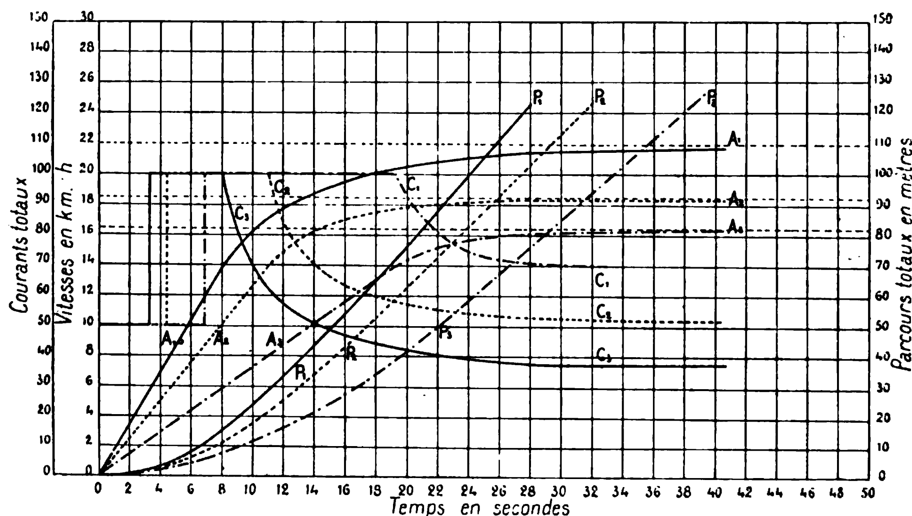


Fig. 830. — Mise en vitesse par la méthode d'accélération constante d'une automobile de 8 t. à 2 moteurs réglés en série-parallèle, remorquant une voiture de 5 t. sur diverses rampes.

C, courants; A, vitesses; P, parcours, en fonction du temps

Traits pleins :	cas d'une rampe de	6,15	mm : m.	vitesse de régime	22,00 km : h.
— pointillés :	—	29,23	—	—	18,40 —
— mixtes :	—	44,61	—	—	16,40 —

la figure 568 (p. 155), et soit P′ + Q′ = 15,5, t. le poids corrigé de l'ensemble (1,28 P + 1,05 Q).

La courbe d'effort moteur se traduira, dans sa partie rectiligne, par la formule F = 11,7 (I — 9).

L'effort moteur en régime permanent devra être 10 (6,15 + 10) + 5 (6,15 + 8) = 200 kg., soit 100 kg. par moteur. D'après les courbes, les régimes seront :

Pour les moteurs en série : vitesse, 10,8 km : h., courant, 18 amp.;

— en parallèle : vitesse, 22 km : h., courant total, 36 amp.

Soient 50 amp. par moteur le courant constant admis pendant la mise en vitesse et 480 kg. l'effort moteur correspondant d'après l'épure. On changera le couplage de série en parallèle à la vitesse pour laquelle le courant dans les

moteurs en série sans rhéostat est précisément de 50 amp., c'est-à-dire à 5,6 km : h. Une fois les moteurs mis en parallèle, ils consommeront au total 100 amp. et pourront atteindre la vitesse de régime de 14 km : h., d'après l'épure. Jusque-là, l'effort accélérateur étant constant, la vitesse croît proportionnellement au temps et l'accélération constante a pour valeur en m : s. par seconde

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g\,(F - \mathfrak{R})}{P + Q} = \frac{9,81 \times 2\,(480 - 100)}{10\,000 + 5\,500} = 0,482 \text{ m : s : s.}$$
$$= 1,735 \text{ km : h : s.}$$

La vitesse de 14 km : h. sera atteinte au bout d'un temps $t = \frac{14}{3,6} : 0,482 =$ 8,07 secondes.

A partir de ce moment, la vitesse croîtra asymptotiquement à l'horizontale de régime, soit 22 km : h.

La courbe correspondante s'obtiendra comme plus haut (p. 519) par l'intégration de l'équation (102)

$$t = \frac{P' + Q'}{g} \sum \frac{\Delta v}{F - \mathfrak{R}}.$$

C'est ce que nous avons fait ici, en prenant comme intervalle élémentaire $\Delta v = 1$ km : h., puis 0,50, puis 0,25 km : h. ; ce calcul est résumé dans le tableau de la page 536, dont les chiffres ont servi à dresser les courbes en traits pleins de la figure 830.

Ce qui précède suppose les moteurs réglés seulement par couplages série-parallèle et par rhéostats en série. Si l'on emploie en outre des shunts sur les inducteurs, le courant se trouvera augmenté au moment où l'on se placera sur la touche correspondante, par suite de la réduction de la f. é. m. ; on devra donc attendre un peu avant de passer à cette position, qui, d'autre part, aura l'avantage de permettre de maintenir plus longtemps les moteurs en série. Dans ce cas, la méthode précédente peut encore être conservée à titre de calcul approximatif, lorsqu'on veut se dispenser de la méthode générale. Du reste, comme on le verra ci-dessous, l'emploi du shunt n'est jamais à recommander pendant les mises en vitesse.

Sur des rampes d'inclinaison croissante, si l'on conserve même limite maxima pour le courant, la mise en vitesse se fera naturellement de moins en moins rapidement. La figure 830 donne à titre comparatif les courbes de démarrage sur deux autres rampes, de 29,23 et 44,61 mm : m. respectivement, toujours sans dépasser 50 ampères par moteur ; les efforts résistants totaux correspondants $\mathfrak{R}$ sont 400 et 600 kg., au lieu de 200 kg. dans le premier cas. Les durées nécessaires pour effectuer un même parcours de 125 m. sont environ 28,32 et 38,5 secondes. Les calculs étant tout à fait semblables à ceux du tableau précité, nous ne les reproduirons pas. On verra du reste plus loin au chapitre XIV de nombreux exemples de ces calculs sur des parcours à déclivité variable ; il faut alors appliquer à chaque instant la valeur effective de la résistance $\mathfrak{R}$ pour déterminer la valeur de l'effort accélérateur correspondant.

ACCÉLÉRATION RAPIDE

VITESSE en km : h.	COUPLAGE des moteurs.	COURANT TOTAL pris à la ligne. Valeur effective.	COURANT TOTAL pris à la ligne. Valeur moyenne dans l'intervalle de deux valeurs effectives.	EFFORT moteur à la jante F correspondant au courant moyen.	EFFORT accélérateur dans un intervalle F' = F — 200	ACCROISSEMENT de vitesse par seconde en km : h. $3,6 \times \frac{9,81}{15\,500} F'$	TEMPS employé pour passer d'une vitesse à la suivante en secondes.	ÉPOQUE en secondes.	DISTANCE PARCOURUE en mètres. Parcours partiels.	DISTANCE PARCOURUE en mètres. Parcours intégrés.
0	Série	50	»	960	760	1,735	»	»	»	»
5,6	Série	50	50	960	760	1,735	3,25	3,25	1,53	1,53
	Parallèle	100								
14	Parallèle	100	100	960	760	1,735	4,82	8,07	14,17	15,70
15	—	86	88	820	620	1,415	0,707	8,78	2,86	18,56
16	—	72	77	690	490	1,115	0,870	9,65	3,75	22,31
17	—	64	68	585	385	0,878	1,140	10,79	5,22	27,53
18	—	56	60	492	292	0,666	1,500	12,29	7,30	31,83
19	—	50	53	410	210	0,479	2,080	14,37	10,70	45,53
20	—	45	47	340	140	0,319	2,470	17,51	17,10	62,63
20,5	—	42	43	293	93	0,212	3,140	19,98	13,90	76,53
21	—	40	41	269	69	0,157	3,180	23,16	18,50	95,03
21,25	—	39	39,5	252	52	0,118	2,120	25,28	12,50	107,53
21,5	—	38	38,5	240	40	0,091	2,740	28,02	16,30	123,83

Conditions pratiques de la mise en vitesse. — Connaissant par ce qui précède le mécanisme du démarrage et de la mise en vitesse, il reste à rechercher les conditions les plus favorables pour cette opération, c'est-à-dire celles qui permettent d'acquérir la vitesse désirée dans le plus court temps et avec la moindre dépense d'énergie possible.

Nous remarquerons tout d'abord que le démarrage n'est possible que si l'effort moteur initial F_0 est plus grand que l'effort résistant :

$$F_0 > P(\beta + i) + Q(\beta' + i).$$

Cela exige un certain courant minimum, au delà duquel le courant supplémentaire produit l'*accélération*. Plus ce courant supplémentaire est considérable, plus l'effort accélérateur $(F - \mathfrak{R})$ est grand et plus la vitesse de régime est atteinte rapidement.

Mais pratiquement cet effort est limité par plusieurs considérations :

1° L'*adhérence* : il faut éviter le patinage des roues, qui réduit leur frottement sur les rails et produit une rapide usure des bandages en même temps qu'une dépense inutile d'énergie ; on devra donc satisfaire à la condition $F_0 < P'' a$, en appelant P'' le poids adhérent, c'est-à-dire le poids reposant sur les essieux moteurs ; on calculera cette limite avant toute étude de démarrage ;

2° L'*échauffement du moteur*, qui, à moins d'employer des moteurs trop puissants relativement au travail moyen qu'ils ont à fournir, ne permet pas de dépasser un certain courant moyen pendant la durée de la mise en vitesse ; ce courant, généralement indiqué par le constructeur [1], est environ double du courant correspondant au régime nominal des fabricants ou triple du courant moyen consommé par la voiture dans l'ensemble de son service ; l'échauffement réduit en outre le rendement des moteurs par l'effet de l'accroissement de la résistance intérieure qui en résulte ; enfin, pour éviter les crachements aux balais, il est bon de maintenir le champ à son maximum pendant le démarrage, qui nécessite dans l'induit le courant maximum ; il est donc bon d'éviter l'emploi de shunts sur les inducteurs pendant les périodes

[1] Voir plus haut les modèles de spécifications (p. 420).

accélératives et de les réserver seulement pour l'accroissement de la vitesse de régime;

3° La *puissance des dynamos génératrices et la section des conducteurs de distribution* : plus on admet des courants élevés au démarrage des voitures, plus on est obligé d'accroître ces deux éléments pour faire face aux énormes variations de débit qui se produisent sur la ligne et à l'usine ; il en résulte une dépense d'installation plus élevée, en même temps qu'un abaissement du rendement moyen de l'usine, qui travaille tantôt en surcharge et tantôt en charge trop faible.

La première et la seconde de ces considérations rendent tout à fait désirable l'emploi d'un courant constant dans chaque moteur pendant toute la durée de l'accélération, car, à effort accélérateur moyen égal, on réalise ainsi la plus faible valeur de l'effort maximum et par conséquent la moindre tendance au patinage, en même temps que la meilleure utilisation des moteurs.

Si la voiture ne comporte qu'un moteur, cette solution réduit également au minimum la plus grande puissance demandée à l'usine génératrice. Il n'en est plus de même lorsque l'équipement comporte plusieurs moteurs avec régulation série-parallèle; il y aurait alors avantage, au point de vue de la variation de la puissance totale demandée au réseau, à réduire le courant dans les moteurs pendant la mise en parallèle, quitte à l'augmenter pendant le couplage en série jusqu'au point où le patinage risquerait de se reproduire. Mais on perd ainsi sur la rapidité du démarrage. Aussi maintient-on ordinairement le courant maximum à la même valeur dans chaque moteur en série, puis en parallèle; on fait ainsi varier le courant total pris à la ligne du simple au double au moment où le couplage change.

Le meilleur moyen de concilier ces conditions contradictoires paraît être d'ajouter en dérivation sur le réseau des batteries d'accumulateurs assez puissantes pour faire face à cette demande temporaire de courant et de donner aux génératrices seulement la puissance *moyenne* nécessaire pour toute la ligne (voir chap. XIV).

Comparaison entre des mises en vitesses plus ou moins rapides réalisées avec un même équipement. — La mise en marche à

courant constant, que nous venons d'étudier, peut être plus ou moins rapide suivant la valeur admise pour le courant individuel. La méthode graphique suivie jusqu'ici se prête encore très facilement à la comparaison des résultats obtenus dans des conditions de vitesse différentes. Cette comparaison sera simplifiée par la remarque que les courbes de vitesse et de courant pendant la période finale d'accélération à courant variable restent les mêmes dans tous les cas : à chaque vitesse correspondent, en effet, un courant et par suite une accélération bien déterminés; les formules exponentielles, où τ reste le même, conduisent à la même conclusion.

On peut donc construire à part une fois pour toutes la courbe d'accélération des moteurs en parallèle à courant variable et en utiliser ensuite, suivant les cas, des tronçons plus ou moins étendus, qu'on reporte à la suite de la droite d'accélération constante.

Par exemple, supposons que nous voulions comparer à la mise en vitesse étudiée dans le paragraphe précédent un démarrage plus lent effectué sous un

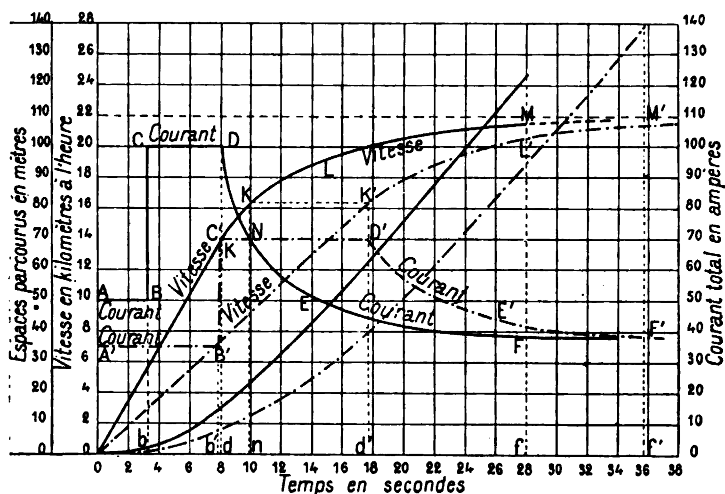


Fig. 831. — Comparaison entre un démarrage rapide et un démarrage lent.

Traits pleins : démarrage rapide avec 50 amp. par moteur. — Traits mixtes : démarrage lent avec 35 amp. par moteur.

courant maximum de 35 amp. (au lieu de 50) donnant un effort moteur de 2×350 kg. seulement. Nous déterminerons d'abord l'accélération pendant la période de courant constant :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{9{,}81 \times 2\ (350 - 150)}{15\,500} = 0{,}253 \text{ m : s : s.};$$

l'époque t du changement de couplage, d'après l'épure de la page 155, correspond à la vitesse de 6,6 km : h. (régime de 35 amp. en série), d'où

$$t = \frac{6,6}{3,6 \times 0,253} = 7,98,$$

l'époque t de la fin de l'accélération constante s'obtient d'après la même épure à la vitesse de 16,3 km : h. (régime 70 amp. en parallèle), d'où

$$t' = \frac{16,3}{3,6 \times 0,253} = 17,7 \text{ secondes.}$$

On trace donc la droite allant de l'origine à la vitesse 16,3 km : h. en 17,7 secondes. Puis, à partir du point extrême obtenu, on reporte la partie de la courbe d'accélération variable qui part de 16,3 km : h., ainsi que la portion correspondante de la courbe du courant.

Le tableau de la page 541 donne les éléments correspondants du calcul et la figure 831 les résume comparativement avec les courbes en traits pleins de la figure 830.

Les parcours effectués jusqu'au moment où l'on atteint la vitesse de 21,5 km : h., que nous prendrons comme fin pratique de la mise en vitesse, sont égaux aux aires des courbes de vitesse ; en intégrant ces dernières, on obtient les courbes de parcours en fonction du temps représentées sur la même épure.

Cela posé, il est facile de comparer l'économie de mises en vitesses plus ou moins rapides, en supposant toujours que le courant admis reste inférieur aux limites fixées ci-dessus par l'échauffement et le patinage. Nous ferons d'abord cette comparaison théoriquement.

1° Il est hors de doute qu'une manœuvre trop rapide d'un régulateur série-parallèle entraîne de sérieuses pertes d'énergie. Si l'on passe, en effet, du couplage en série au couplage en parallèle avant que la voiture ait pris la vitesse suffisante pour ramener dans le groupement en série sans rhéostat le courant à la valeur moyenne fixée comme maximum, on ne tire pas tout le parti possible du couplage en série, qui, avec un courant moitié moindre, donne même couple moteur total que le suivant, et on augmente inutilement la dépense de courant pendant le couplage en parallèle.

Ces conclusions sont depuis longtemps confirmées par l'expérience. M. G. W. Knox, ingénieur du Chicago City Railway a publié notamment [1] des

[1] *Street Railway Journal*, septembre 1897. Si l'on compare ces courbes relevées au jugé, à l'aide de lectures à vue faites à l'ampèremètre, à celles de la figure 823 (p. 525), on voit qu'elles ne ressemblent guère à la réalité ; on ne peut donc leur accorder qu'une valeur très approximative.

ACCÉLÉRATION LENTE

VITESSE en km : h.	COUPLAGE des moteurs.	COURANT TOTAL pris à la ligne. Valeur effective.	COURANT TOTAL pris à la ligne. Valeur moyenne dans l'intervalle de deux valeurs effectives.	EFFORT moteur à la jante F correspondant au courant moyen.	EFFORT accélérateur dans un intervalle F' = F — 200	ACCROISSEMENT de vitesse par seconde en km : h. $3,6 \times \frac{9,81}{15\,500} F'$	TEMPS employé pour passer d'une vitesse à la suivante en secondes.	ÉPOQUE en secondes.	DISTANCE PARCOURUE en mètres. Parcours partiels.	DISTANCE PARCOURUE en mètres. Parcours intégrés.
0	Série	35	»	»	»	»	»	»	»	»
			35	700	500	1,140	6,60		8,07	
6,6	Série Parallèle	35 70						7,98		8,07
			70	700	500	1,140	9,72		31,53	
16,3	»	70						17,70		39,60
			67	573	373	0,852	0,700		3,24	
17	Parallèle	64						18,40		42,84
			60	492	292	0,666	1,500		7,30	
18	—	56						19,90		50,14
			53	410	210	0,479	2,080		10,70	
19	—	50						21,98		60,84
			47	340	140	0,319	3.140		17,10	
20	—	45						25,12		77,94
			43	293	93	0,212	2,470		13,90	
20,5	—	42						27,59		91,84
			41	269	69	0,157	3,180		18,50	
21	—	40						30,77		110,34
			39,5	252	52	0,118	2,120		12,50	
21,25	—	39						32,89		122,84
			38,5	240	40	0,091	2,740		16,30	
21,5	—	38						35,63		139,14

courbes (fig. 832), qui, bien que visiblement fort imparfaites, montrent néanmoins clairement l'importance des pertes que peut occasionner une manœuvre de ce genre sur une automobile à deux moteurs. La courbe de bon démarrage

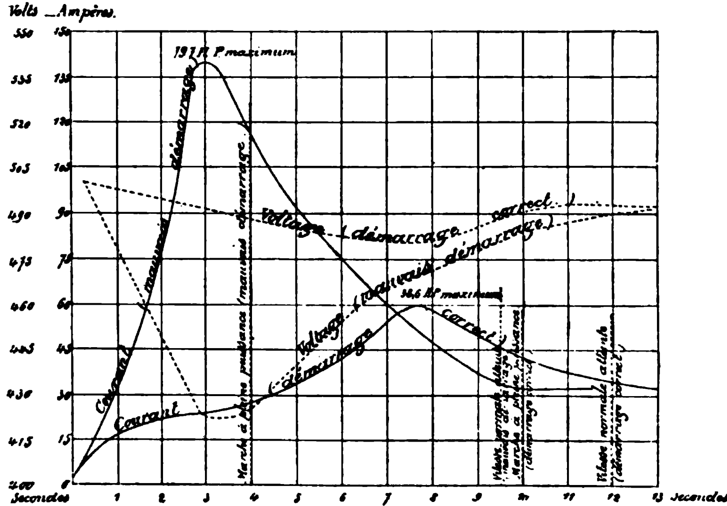


Fig. 832. — Comparaison entre un bon et un mauvais démarrage.

Traits pointillés : bon démarrage. — Traits pleins : démarrage trop brusque.

est obtenue en ne passant au couplage en parallèle qu'au milieu de la période d'accélération, tandis que celle de mauvais démarrage correspond à un changement de couplage prématuré.

Le tableau suivant résume la comparaison entre ces deux cas.

	DÉMARRAGE brusque, mauvais.	DÉMARRAGE lent, bon.
Durée de manœuvre du régulateur	4 secondes	10 secondes
Durée de la mise en vitesse.	9,5 —	12 —
Parcours total avant la pleine vitesse	25,90 m.	45,72 m.
Courant maximum	140 amp.	60 amp.
Chute de potentiel maxima	80 volts	20 volts
Puissance moyenne dépensée.	32 300 watts	18 500 watts
Energie consommée.	307 170 joules	221 676 joules
Différence de consommation en plus	23,74 watts-h.	»

On voit que la vitesse maxima est atteinte presque aussi vite dans le second cas que dans le premier (12 secondes au lieu de 9,5), tandis que la différence d'énergie atteint 23,74 w.-h., soit 30 p. 100.

M. Knox estime à 20 p. 100, dans le cas général, l'économie d'énergie qu'on peut réaliser sur un réseau en ralentissant le démarrage des voitures. Il faut aussi observer qu'on réduit en même temps le nombre des induits brûlés.

Les chiffres précédents, sur lesquels nous reviendrons au chapitre suivant dans l'étude des dépenses d'énergie, mettent bien en évidence le fait qu'en précipitant la manœuvre du régulateur on ne gagne que peu de temps sur la mise en vitesse, tandis qu'on dépense beaucoup plus d'énergie, tout en fatiguant davantage les moteurs et les engrenages.

Une autre cause, souvent très importante, de la perte d'énergie occasionnée par la manœuvre trop rapide du régulateur est le patinage des roues, qui, aussitôt produit, réduit l'accélération. Par exemple, dans les expériences que nous venons de citer, M. Knox a trouvé une vitesse moyenne de 2,71 m. par seconde dans le démarrage précipité, au lieu de 3,80 dans le démarrage régulier, ce qui indiquerait la production dans le premier cas d'un fort patinage.

Enfin, bien des mécaniciens tournent leur manette avec la même rapidité dans tous les cas, quelle que soit la déclivité de la voie, soumettant ainsi les moteurs à un courant exagéré sur les rampes et faisant même sauter les plombs fusibles. C'est là une pratique absolument condamnable, et l'on doit au contraire leur apprendre à manœuvrer le régulateur très lentement sur les fortes déclivités, s'ils n'ont pu éviter de s'y arrêter. La meilleure méthode à ce point de vue serait de mettre sous les yeux de chaque conducteur un ampèremètre marqué d'un trait rouge en regard du courant maximum qu'il ne devra pas dépasser.

Pour contrôler le soin apporté par les mécaniciens à la conduite des voitures, il est du reste fort utile de placer sur celles-ci à tour de rôle un ampèremètre enregistreur. M. Cravath est arrivé plus simplement à un résultat analogue en disposant une bande d'alliage fusible près d'un conducteur fin parcouru par le courant qui le porte à haute température[1] ; d'après la quantité de métal fondue, on peut apprécier grossièrement le courant maximum employé ; la même bande peut servir à plusieurs parcours successifs ; on l'avance de quelques millimètres à chaque fois et on contrôle l'ensemble à la fin de la journée.

2° Mais ce n'est là encore qu'un des côtés de la question et l'on

[1] Cf. *Street Railway Review*, avril et août 1897.

doit se demander en outre si, en supposant que le changement de couplage ait lieu au moment voulu, il y a intérêt à admettre pour le courant individuel maximum une valeur plus ou moins élevée.

Pour résoudre ce problème, il nous suffira de raisonner sur le cas le plus simple, celui de la mise en marche à courant individuel constant avec résistance à la traction constante. La vitesse obtenue sous l'action de l'effort accélérateur ($F - \mathfrak{R}$) constant est donnée, en appelant P′ le poids corrigé de l'inertie, par la relation

$$V = \frac{g}{P'} (F - \mathfrak{R})\, t;$$

en remplaçant F par sa valeur approximative, proportionnelle au courant I diminué du courant de pertes j_o,

$$F = K (I - j_o),$$

on obtient la valeur pratique

$$V_{m:s.} = \frac{g}{P'} [K (I - j_o) - \mathfrak{R}]\, t.$$

Le rapport de la vitesse ainsi obtenue à l'énergie dépensée,

$$\frac{V_{m:s.}}{UIt} = \frac{gK}{P'U} \left[1 - \frac{j_o}{I} - \frac{\mathfrak{R}}{KI}\right],$$

croît évidemment avec I.

L'accélération à intensité constante est donc d'autant plus économique que le courant maximum admis dans chaque moteur est plus élevé, c'est-à-dire que l'accélération elle-même est plus rapide[1].

Pendant la période d'accélération variable qui suit l'accélération constante, les courbes de courant sont, comme on le sait, empruntées toutes à une même courbe ; l'aire comprise entre le tronçon utilisé et l'axe des abscisses est plus grande pour le cas de l'accélération rapide que pour celui de l'accélération lente, parce que la courbe part de plus haut ; mais le chemin parcouru est lui-même accru dans une proportion en général plus grande.

[1] On remarquera que dans ce système de régulation les résistances en série n'apparaissent pas dans l'expression du rendement, parce que la dépense de courant It est fixée a priori.

Par suite, avec un équipement donné, l'énergie dépensée pour atteindre une certaine vitesse reste sensiblement moindre avec une accélération rapide qu'avec une accélération lente.

A titre d'exemple, nous avons calculé les dépenses d'énergie des deux cas de la figure 831 (p. 539) en planimétrant les courbes de courant. On trouve ainsi les résultats suivants :

Mise en marche rapide.

Aire $\overline{oABb}$ =	50 × 3,25 =	163	ampères-secondes.
Aire $\overline{bCDd}$ =	100 × 4,82 =	482	—
Aire $\overline{dDNn}$ =		148	—
Aire $\overline{nNFf}$ =		832	—
Total.		1 625	—

Mise en marche lente.

Aire $\overline{oA'B'b'}$ =	35 × 7,98 =	279	ampères-secondes.
Aire $\overline{b'C'D'd'}$ =	70 × 17,7 =	1 239	—
Aire $\overline{d'D'F'f'}$ =	$\overline{nNFf}$ =	832	—
Total.		2 350	—

A 500 volts, les dépenses d'énergie correspondantes sont :

Dans le premier cas, 1 625 × 500 = 812 500 joules = 226 w.-h.
Dans le deuxième cas, 2 350 × 500 = 1 175 000 — = 326 —

Évaluons maintenant le travail effectué [1]. Il comprend dans les deux cas le travail nécessaire pour vaincre l'inertie :

$$\frac{1}{2} \mathrm{PV}^2 = \frac{15\,500}{2} \left(\frac{21,5}{3,6}\right)^2 = 276\,000 \text{ joules.}$$

D'autre part, il faut ajouter le travail dépensé pour vaincre les résistances normales de traction, évaluées plus haut à 200 kg. Ce travail est égal à

$$200 \times 9,81 \times l = 1\,962\, l \text{ joules,}$$

en appelant l le parcours effectué calculé ci-dessus (124 et 134 m. en chiffres ronds). On trouve ainsi :

Accélération rapide, 276 000 + 243 000 joules = 144 watts-heures,
— lente, 276 000 + 263 000 joules = 149 — ,

[1] On pourrait l'obtenir en planimétrant la courbe des efforts, mais le calcul indiqué est plus rapide.

d'où les rendements correspondants :

$$\frac{144}{226} = 64 \text{ p. } 100,$$

$$\frac{149}{326} = 46 \text{ p. } 100.$$

Valeur économique de l'accélération rapide sur une ligne à arrêts fréquents où la vitesse entre stations est fixée. — Jusqu'ici, nous avons supposé la vitesse maxima V fixée invariablement. Il est nécessaire d'ajouter que l'avantage des accélérations rapides se trouve beaucoup accru sur les lignes à arrêts fréquents,

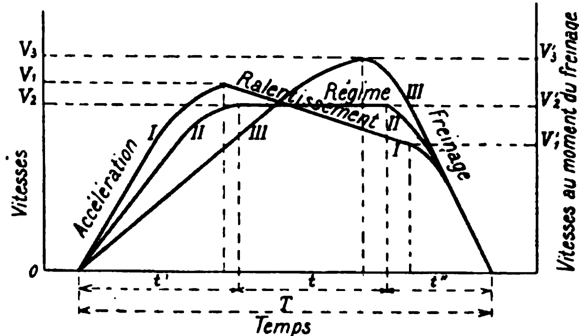


Fig. 833. — Différentes méthodes de traction sur une ligne à arrêts rapprochés.

I, accélération, ralentissement spontané, freinage. — II, accélération, vitesse de régime, freinage. III, accélération, freinage.

telles que les tramways urbains et les chemins de fer métropolitains, par suite de la répercussion de la durée des mises en vitesse sur la valeur de la vitesse maxima nécessaire. En effet, on se donne en général la durée des arrêts et la vitesse commerciale à réaliser ; la vitesse moyenne entre stations est donc fixée, tandis que la vitesse maxima qui en résulte peut être très différente suivant la rapidité plus ou moins grande des accélérations.

On peut représenter graphiquement ces conditions de marche en traçant une courbe de la vitesse pendant le parcours du véhicule entre deux arrêts en fonction du temps. La figure 833 représente trois courbes de ce genre, qui caractérisent trois méthodes différentes entre lesquelles on peut choisir.

La première I correspond au cas où l'on supprime le courant dès

que la période d'accélération est terminée; à partir de ce moment, la vitesse décroît suivant une loi sensiblement linéaire [1] en vertu des résistances passives; puis, au moment où l'on applique les freins, il se produit un ralentissement énergique dont l'accélération négative, que nous appellerons *retardation*, devient à peu près constante à partir du moment où le serrage est obtenu jusqu'à l'arrêt; la figure 935 (p. 765) donne, par exemple, une forme type du ralentissement par freins à air comprimé.

La seconde courbe II s'applique à un autre système de marche : on laisse la vitesse atteindre un maximum un peu moins élevé que

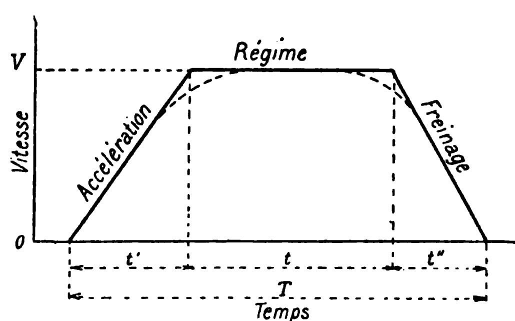


Fig. 834. — Courbe de vitesse simplifiée.

précédemment; puis, on la maintient constante à cette valeur jusqu'au moment du freinage.

Enfin, dans le cas de la courbe III, l'accélération est plus faible; mais on la prolonge jusqu'au moment même de l'application des freins.

Quel que soit le mode d'opérer, l'aire comprise entre l'une ou l'autre des trois courbes et l'axe des abscisses représente le parcours effectué, et doit par conséquent être la même.

On voit que la fin de l'accélération et le commencement de la retardation donnent lieu à des tronçons courbes, d'une part parce que la vitesse maxima doit, comme on le verra plus loin, se rapprocher de la vitesse asymptotique d'accélération, d'autre part parce que les freins ne doivent être serrés que progressivement

[1] En réalité, les résistances décroissant avec la vitesse, la retardation n'est pas tout à fait uniforme, mais nous le supposons ici pour simplifier.

pour ne pas occasionner trop de secousses. Mais on ne commettra pas une grande erreur en supposant l'accélération uniforme pendant la mise en vitesse et de même la retardation pendant l'application des freins, ce qui revient à remplacer les courbes par des droites, comme le représente par exemple la figure 834.

Les pertes d'énergie dépendent de la force vive perdue pendant le freinage, c'est-à-dire du carré V'^2 de la vitesse effective au moment de l'application des freins. C'est donc la courbe I qui paraît être la plus économique [1], bien qu'elle présente une vitesse maxima plus élevée que II ; mais elle demande un moteur plus

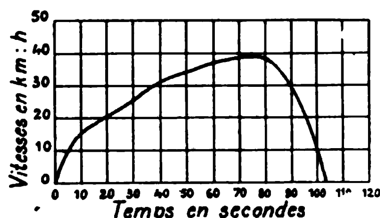


Fig. 835. — Courbe type des vitesses en fonction du temps entre deux stations du Metropolitan Elevated R. R. de Chicago.

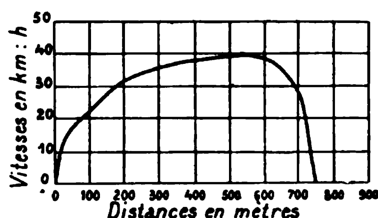


Fig. 836. — Même courbe que celle de la figure précédente, mais rapportée aux distances en abscisses.

puissant et, par suite, plus lourd et plus cher que la courbe II. Celle-ci diffère du reste toujours peu de la courbe I, par suite de la faible retardation que produisent les résistances passives seules. D'autre part, la courbe III est très peu économique et ne donne pas à l'exploitation la même sécurité que les autres, parce qu'elle ne permet pas de regagner un retard. C'est donc, en général, par la courbe moyenne II qu'on pourra représenter les conditions d'une bonne exploitation.

Jusqu'à présent, comme le montre par exemple la figure 835, qui représente la courbe type du Metropolitan West Side Elevated R. R. de Chicago, on s'est rapproché plutôt de la forme III, la moins économique, faute de moteurs assez puissants ou assez nombreux pour mettre les trains en vitesse très rapidement (voir p. 581).

[1] Encore ce point est-il discutable, car avec la courbe I les moteurs ne travaillent qu'en mise en vitesse, c'est-à-dire avec un rendement médiocre, tandis qu'avec la courbe II, ils fournissent une partie de leur travail à vitesse normale, c'est-à-dire avec un rendement normal.

Il importe de remarquer en passant que la même courbe, rapportée aux longueurs en abscisses (fig. 836), présente une forme un peu différente et paraît donner un accroissement de vitesse plus rapide ; il faut éviter les confusions résultant de ces deux modes de représentation.

Dans ce qui suit, pour simplifier les raisonnements, nous nous placerons dans le cas de la courbe II, que nous prenons comme moyenne. Nous allons chercher d'abord comment on peut réduire au minimum la dépense d'énergie consommée entre deux stations.

Soient (fig. 833) L la distance qui les sépare, t_a la durée d'un arrêt, V_m la vitesse maxima, t sa durée d'application, t' et t'' les durées d'accélération et de ralentissement, V' et V'' les vitesses moyennes correspondantes, $T = t + t' + t''$ la durée totale d'un parcours entre deux arrêts; l'espace parcouru correspondant, c'est-à-dire la distance entre les stations, est donné par la relation

$$L = V_m t + v't' + v''t''$$

et la vitesse moyenne entre stations, qui est imposée, a pour valeur

$$V = \frac{L}{T}.$$

Si l'on suppose, par approximation, les accélérations initiale A et finale A' constantes, les durées t' et t'' se déduisent de la vitesse maxima par les relations :

$$t' = \frac{V_m}{A};$$

$$t'' = \frac{V_m}{A'}.$$

D'autre part, la vitesse moyenne pendant les temps t' et t'' est $\frac{V_m}{2}$.

On a donc approximativement

$$L = V_m \left(t + \frac{t' + t''}{2}\right) = V_m \left(T - \frac{t' + t''}{2}\right),$$

d'où

$$V_m = \frac{L}{T - \frac{t' + t''}{2}}$$

$$= V \frac{2T}{2T - (t' + t'')}.$$

En réduisant t', on abaisse la vitesse maxima V_m, d'autant plus que t' est plus grand par rapport à T. L'énergie perdue par suite du freinage à partir de la vitesse V_m, qui a pour valeur $\frac{P}{2g} V_m^2$, décroît donc rapidement avec t', ce qui donne un avantage aux accélérations rapides. La dépense d'énergie nécessaire pour vaincre les résistances passives reste d'ailleurs la même dans tous les cas, ce qui nous dispense de la faire intervenir dans la comparaison.

Prenons, par exemple, le cas d'un métropolitain à stations espacées de 500 m., exploité avec une vitesse moyenne V de 25 km : h. et des arrêts de 15 secondes. La durée totale $T = \frac{0,500}{25} = 0,020$ heure $= 72$ secondes. Soit 15 secondes la durée admise pour le ralentissement; il reste seulement 42 secondes pour l'accélération et la marche à pleine vitesse. Supposons qu'on affecte ces 42 secondes entièrement à l'accélération, en faisant $t = 0$; il faudra réaliser une vitesse maxima égale à

$$V = \frac{500}{72 - 15 - \left(\frac{42 + 15}{2}\right)} = \frac{500}{28,5} = 17,5 \text{ m : s.}$$
$$= 63 \text{ km : h.}$$

Au contraire, supposons que l'accélération ait lieu en 30 secondes seulement et que les 12 autres soient utilisées à vitesse maxima ; celle-ci deviendra

$$V' = \frac{500}{72 - 15 - \frac{30 + 15}{2}} = \frac{500}{34,5} = 14,5 \text{ m : s.} = 52,2 \text{ km : h.}$$

La force vive est donc réduite dans le rapport $\left(\frac{14,5}{17,5}\right)^2 = 0,685$, ce qui entraîne une réduction du même ordre sur la perte d'énergie, car le rendement pendant l'accélération est à peu près le même dans tous les cas avec des moteurs appropriés à chacun d'eux.

Les courbes expérimentales d'accélération conduisent aux mêmes conclusions. Par exemple, en comparant les deux courbes équivalentes de la figure 837 correspondant à des essais qu'il a effectués à Schenectady[1] et sur lesquels nous reviendrons plus loin, M. W. B. Potter a trouvé que la consommation d'énergie dans

[1] Cf. *Street Railway Journal*, octobre 1897. La seule partie expérimentale de ces courbes est la mise en vitesse; le freinage a été simplement calculé au taux de 73 kg. d'effort retardateur par tonne, auquel s'ajoute une résistance au roulement de 10 kg : t. ; mais cette manière de faire n'infirme en rien les conclusions, puisque la dépense d'énergie n'a lieu que pendant la mise en vitesse.

le cas de l'accélération rapide (courbes en traits pleins) était de

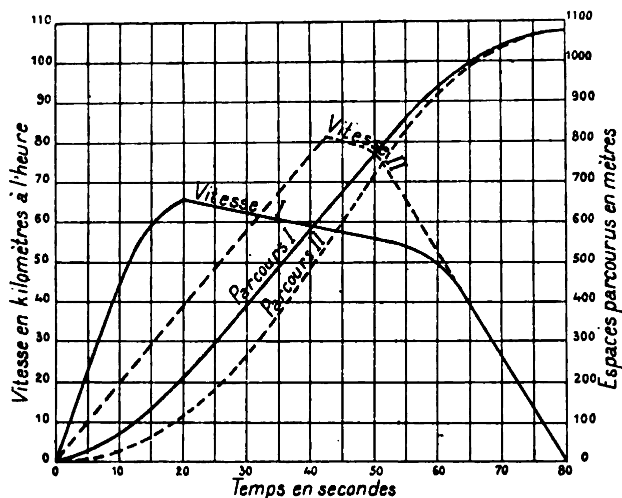


Fig. 837. — Courbes de vitesse d'une automobile électrique de 25 t. à 4 moteurs, effectuant un même parcours entre deux stations.
Traits pleins : accélération rapide. — Traits pointillés : accélération lente.

64 w.-h. par tonne-kilomètre (puissance électrique moyenne 11 kw.) avec un effort de traction maximum de 105 kg : t. et dans le cas de l'accélération lente (traits pointillés) de 100 w.-h. (puissance électrique moyenne 15 kw.) avec un effort de traction de 65 kg : t., soit une augmentation de 58 p. 100.

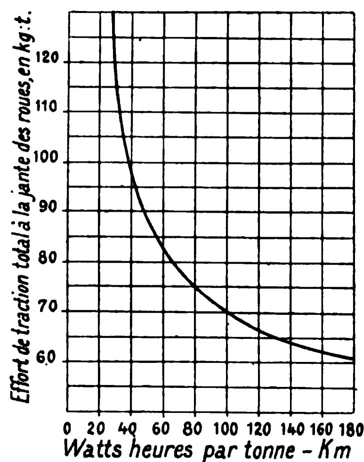


Fig. 838. — Dépense d'énergie en fonction de l'effort accélérateur admis au démarrage, avec un coefficient de traction de 9 kg : t. sur un parcours de 100 m. avec une vitesse moyenne de 38,9 km : h.

Le même auteur a déduit de ces essais la courbe plus complète de la figure 838, qui représente les dépenses d'énergie pour d'autres valeurs de l'effort accélérateur. On voit que ces dépenses s'abaissent de 180 w.-h. par t.-km. à 30 w.-h. seulement quand on porte l'effort accélérateur de 60 kg. à 120 kg. par tonne de train (au delà de ce chiffre on gagne peu sur la consommation).

A ne considérer que la dépense d'énergie, on devrait, d'après ces considérations, chercher à réaliser un pouvoir accélérateur voisin de la limite que permet l'adhérence totale. Mais ce n'est là qu'une des faces du problème, et, si on l'envisageait seule, on serait conduit à exagérer quelquefois la puissance des moteurs, l'intensité du courant au moment du démarrage et la puissance disponible des dynamos génératrices. Il est donc bon de compléter cette analyse par la recherche des conditions les plus économiques d'établissement, en déterminant maintenant la vitesse V qui rend minima la puissance des moteurs, ou, ce qui revient au même[1], l'intensité du courant qu'ils absorbent à un voltage donné.

Valeur de l'accélération correspondant à la puissance minima des moteurs. — La puissance nominale des moteurs est déterminée par le produit de leur effort maximum F_o, réalisé au démarrage, par leur vitesse maxima V_m, atteinte après la période d'accélération. On doit donc chercher à rendre minimum le produit

$$F_o V_m,$$

tout en réalisant pour l'aire de la courbe des vitesses en fonction du temps la valeur constante égale à la distance des deux stations.

Cela conduit d'abord à faire préférer la forme de courbe II de la figure 833, comme nous l'avons déjà dit, parce qu'à effort moteur égal une vitesse maxima un peu plus faible suffit à donner au diagramme la surface voulue.

Il nous reste alors à comparer des courbes de ce genre, que nous remplaçons, pour simplifier, par le trapèze de la figure 834, en supposant qu'on fasse varier la hauteur du trapèze et l'inclinaison de son côté gauche.

La condition qui exprime la constance de l'aire du trapèze est

$$L = V_m \left(T - \frac{V_m}{2A} - \frac{V_m}{2A'}\right)$$

ou, en remarquant que

$$\frac{P}{g} A = F_o,$$

$$L = V_m T - \frac{V_m^2 P}{2g F_o} - \frac{V_m^2}{2A'}.$$

[1] En supposant que les moteurs qu'on emploierait pour réaliser les différentes puissances aient même rendement, ce qui est sensiblement exact.

Le minimum de $F_o V_m$, qui se calcule aisément[1], est obtenu lorsque

$$T - \frac{3}{2}\frac{V_m}{A} - \frac{V_m}{A'} = 0,$$

$$V_m = 2A'T\left[1 - \sqrt{1 - \frac{3}{2}\frac{L}{T}\frac{1}{A'T}}\right].$$

D'où

$$A = 3A' : \left(\frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{3}{2}\frac{L}{T}\frac{1}{A'T}}} - 2\right).$$

Dans ces expressions, $\frac{L}{T}$ n'est autre que la vitesse moyenne entre stations, qui est donnée. L'effort accélérateur correspondant égale 102 A, si A est exprimé en m : s. par seconde.

Quant à la retardation A', due à l'effet des freins, on la détermine facilement. Sur une voie en palier, on admet généralement un effort retardateur de 75 à 150 kg. par tonne de train pour ne pas

[1] Suivant une règle connue, on annule les deux dérivées par rapport à F_o et V_m de la fonction

$$V_m T - \frac{P V_m^2}{2g F_o} - \frac{V_m^2}{2A'} + \lambda F_o V_m,$$

en appelant λ une constante arbitraire :

$$T - \frac{PV_m}{gF_o} - \frac{V_m}{A'} + \lambda F_o = 0,$$

$$\frac{PV^2_m}{2gF_o^2} + \lambda V_m = 0.$$

D'où, en éliminant λ,

$$T - \frac{3}{2}\frac{PV_m}{gF_o} - \frac{V_m}{A'} = 0$$

ou

$$T - \frac{3}{2}\frac{V_m}{A} - \frac{V_m}{A'} = 0\,;$$

d'où encore

$$\frac{V_m^2 P}{2gF_o} = \frac{TV_m}{3} - \frac{V_m^2}{3A'}$$

et par suite, en substituant dans la valeur de L,

$$L = \frac{2}{3} V_m T - \frac{V_m^2}{6A'}$$

ou

$$V_m^2 - 4A' V_m T + 6LA' = 0.$$

La racine négative de cette équation est

$$V_m = 2\left[A'T - \sqrt{(A'T)^2 - \frac{3}{2} LA'}\right] = 2A'T\left[1 - \sqrt{1 - \frac{3}{2}\frac{L}{T}\frac{1}{A'T}}\right].$$

C'est d'ailleurs la seule admissible, car la racine positive donnerait

$$V_m > 2A'T,$$

valeur évidemment trop grande.

donner lieu à un patinage des roues (coefficient d'adhérence 0,075 à 0,15) ; on en déduit, en appelant π le poids total freiné,

$$A' = \frac{(0{,}075 \text{ à } 0{,}15))\ \pi \times 9{,}81}{\pi} = 0{,}735 \text{ à } 1{,}47 \text{ m : s : s.}$$

Le premier de ces chiffres est à peu près celui qu'on réalise pratiquement sur les métropolitains à vapeur ; sur les automobiles électriques, on dépasse facilement 1,5 m : s : s. Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre XV.

En admettant pour A' le chiffre de 1 m : s : s. (qui correspond à un effort retardateur de 102 kg : t.) comme une bonne moyenne, on obtient les chiffres du tableau suivant :

DURÉE du parcours T en secondes.	Valeurs correspondantes de V_m et A pour diverses vitesses entre stations en kilomètres à l'heure.									
	$\frac{L}{T} = 15$		$= 20$		$= 25$		$= 30$		$= 40$	
	V_m	A	V_m	A	V_m	A	V_m	A	V_m	A
	km : h.	m : s : s.	km : h.	m. s : s.	km : h.	m : s : s.	km : h.	m : s : s.	km : h.	m : s : s.
60	23,112	0,647	31,104	0,908	38,88	1,184	47,624	1,527	64,917	2,320
80	23,04	0,47	30,816	0,647	38,659	0,841	46,915	1,0505	63,500	1,527
100	22,896	0,367	30,672	0,503	38,52	0,647	46,512	0,801	62,726	1,140
120	22,81	0,301	30,542	0,411	38,362	0,526	46,224	0,647	62,208	0,908
150	22,734	0,237	30,446	0,323	38,178	0,411	45,976	0,503	61,56	0,685
180	22.68	0,194	30,326	0,265	38,054	0,337	45,814	0,411	61,43	0,565
240	22,637	0,145	30,24	0,194	37,912	0,248	45,619	0,301	61,082	0,411
300	22,626	0,116	30,218	0,155	37,80	0,196	45,468	0,237	60,892	0,323
400	22,608	0,0869	30,168	0,116	37,728	0,145	45,36	0,173	60,624	0,237

Les efforts accélérateurs correspondants ont pour expression, en kg : t., 102 A.

Les chiffres de ce tableau, par suite même de leur origine approximative, n'ont pas une valeur absolue et doivent être considérés comme de simples points de repère. Dans certains cas, du reste, ils conduiraient à des accélérations trop élevées pour l'adhérence ou au contraire inférieures à celles que réalisent sans difficulté les moteurs usuels; on les corrigera en tenant compte des chiffres d'expérience que nous donnons plus loin. Dans le cas des métropolitains, on devra d'ailleurs vérifier les résultats en traçant le graphique de marche d'un train le long de la ligne, comme on le verra au chapitre XIV.

Choix des moteurs pour les services à accélération rapide. — On voit, d'après ce qui précède et comme nous l'avons fait remarquer plus haut (p. 481), que le choix d'un moteur destiné à un service à arrêts très fréquents ne peut être fait d'après la considération des régimes permanents seule, mais que la question de l'accélération doit intervenir d'une façon prépondérante. Les remarques précédentes donnent les éléments suffisants pour en tenir compte, puisqu'elles indiquent d'une part l'effort maximum F_0 que le moteur doit pouvoir développer et la vitesse V_m maxima; ces deux éléments déterminent un moteur et son train d'engrenages, comme on l'a vu précédemment[1]. Nous reviendrons avec plus de détails sur ce sujet dans les projets étudiés au chapitre XIV.

Pour réduire la période d'accélération variable et se réserver une marge pour rattraper un retard accidentel, il est bon, surtout sur les tramways où le nombre des arrêts n'est pas fixé, de majorer la vitesse de régime V_m de 15 à 20 p. 100. Dans ce but, il suffit de se réserver comme marge la marche en parallèle avec shunt. Du reste, si l'on dispose d'une batterie d'accumulateurs en dérivation sur le réseau ou si le nombre des voitures est suffisant pour uniormiser la charge en dépit des démarrages individuels, l'accélération rapide devient la plus avantageuse à tous points de vue.

Limites pratiques de l'accélération dans la traction électrique; supériorité de ce mode de traction à ce point de vue. — Pour compléter les considérations précédentes, il nous reste à indiquer les limites pratiques d'accélération qu'on peut admettre pour permettre au moteur électrique de réaliser dans des services rapides toute la supériorité qu'il présente sur les autres moteurs en raison du plus grand effort qu'il est capable de développer à poids égal. Cet effort peut atteindre $\frac{1}{7}$ et même $\frac{1}{5}$ du poids total d'une locomotive électrique[2] et $\frac{1}{20}$ de celui d'un train métropolitain, comme

[1] Il est à remarquer que la vitesse de régime du véhicule varie en raison inverse du nombre de spires et du coefficient de réduction des engrenages, tandis que l'effort accélérateur obtenu par ampère varie au contraire proportionnellement à ces quantités. On ne peut donc accroître cet effort pour un moteur de carcasse donnée qu'au détriment de la vitesse ou inversement.

[2] La locomotive électrique minière de 200 chev. des Cies Baldwin-Westinghouse donne même le 1/4 de son poids, d'après les constructeurs.

on le verra plus loin, tandis que les locomotives à vapeur d'express ne donnent guère que $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{9}$ de leur poids et $\frac{1}{50}$ du poids total du train remorqué.

L'effort d'accélération[1] d'une locomotive à vapeur d'express au début du démarrage est de 28 à 35 kg. par tonne remorquée ; il s'abaisse ensuite rapidement à 20 et 5 kg. pendant le reste de la mise en vitesse, comme le montre par exemple la figure 839 représentant un diagramme de marche d'un train de banlieue de l'Illinois Central R.R. Au contraire, comme on le voit sur le tableau ci-contre, qui résume diverses données américaines, l'effort accélérateur d'un train électrique formé d'une locomotive et de voitures remorquées peut atteindre 40 ou 50 kg. par tonne, comme cela a lieu sur le City and South London Ry., ou 70 kg., comme sur le Metropolitan Elevated de Chicago, ou même le double comme nous le dirons ci-dessous. De plus, ainsi qu'on l'a vu plus haut, cet effort maximum peut, grâce à la régulation série-parallèle, être entretenu économiquement pendant la plus grande partie de la mise en vitesse et réaliser ainsi l'accélération maxima d'une façon prolongée.

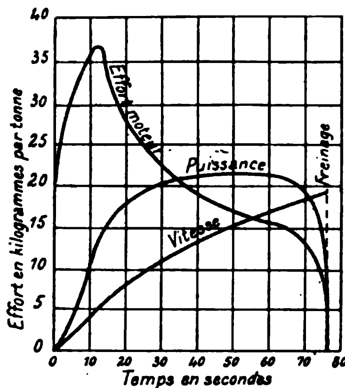


Fig. 839. — Courbes de marche entre stations d'un train de banlieue de l'Illinois Central R. R.

Comme, sur les chemins de fer urbains ou suburbains et même sur les tramways, la condition essentielle dont doit se préoccuper le service de l'exploitation est la réalisation d'une vitesse commerciale aussi élevée que possible, il est intéressant de connaître les limites qu'imposent à l'accélération l'adhérence et le confort des voyageurs.

1° *Adhérence.* — L'adhérence peut être utilisée presque complètement si l'on a des trains longs remorqués par une locomotive ou une automotrice, et c'est elle qui, dans ce cas, fixe seule la limite de l'accélération possible.

[1] Déduction faite de l'effort résistant correspondant.

ACCÉLÉRATIONS RÉALISÉES EN SERVICE OU EN ESSAIS AVEC DIVERS MATÉRIELS DE MÉTROPOLITAINS

COMPAGNIE DE CHEMINS DE FER	MODE DE TRACTION	NOMBRE DES VOITURES	POIDS NET DU TRAIN EN TONNES	DÉCLIVITÉS	EFFORT de traction net par tonne. Maximum pour le temps donné. Durée en secondes.	Effort en kg.	Moyenne pour le temps total. Durée en secondes.	Effort en kg.	10 SECONDES Évaluation moyenne de l'accélération en km : h : s.	Vitesse en kilomètres à l'heure.	Distance parcourue en mètres.	20 SECONDES Évaluation moyenne de l'accélération en km : h : s.	Vitesse en kilomètres à l'heure.	Distance parcourue en mètres.	30 SECONDES Évaluation moyenne de l'accélération en km : h : s.	Vitesse en kilomètres à l'heure.	Distance parcourue en mètres.	40 SECONDES Évaluation moyenne de l'accélération en km : h : s.	Vitesse en kilomètres à l'heure.	Distance parcourue en mètres.
Metropolitan Elevated.	Électrique (6,79 kg. de frottement par tonne).	2	44	0	10	71	40	41	2,5	26	36	1,8	36	100	1,69	51	201	1,39	56	306
Lake Street Elevated .	Électrique (6,79 kg. de frottement par tonne).	2	44	0	10	54	40	34	1,9	19	27	1,6	33	91	1,24	37	155	1,11	44	265
Alley Elevated	A vapeur (6,79 kg. de frottement par tonne). .	3	72	0	10	54	40	39	1,9	19	27	1,5	31	87	1,28	38	164	1,15	46	256
Illinois Central. . . .	A vapeur (6,79 kg. de frottement par tonne) . .	4	116	0	10	38	40	32	1,3	13	18	1,15	23	64	1,09	33	137	1,02	40	229
Manhattan Elevated. .	A vapeur (6,79 kg. de frottement par tonne . .	4	95	0	10	36	40	27	1,2	12	167	1,08	22	60	0,93	27	118	0,83	33	187
Essais de la General Electric Co. à Schenectady (1897).	Électrique (9,06 kg. de frottement par tonne).	1	25	0	10	127	20	84	4,8	48	67	3,05	61	169	»	»	»	»	»	»
	Électrique (9,06 kg. de frottement par tonne).	1	9	0	10	119	20	90	4,5	45	63	3,29	66	183	»	»	»	»	»	»
	Électrique (9,06 kg. de frottement par tonne).	1	9	0	10	73	20	57	2,6	25	36	1,9	38	99	»	»	»	»	»	»

Au contraire, dans les exploitations comportant des trains légers dont une ou plusieurs voitures sont des automobiles et sur les tramways, on reste forcément au-dessous de cette limite pour éviter des variations de courant exagérées sur la ligne et à la station et des démarrages trop brusques.

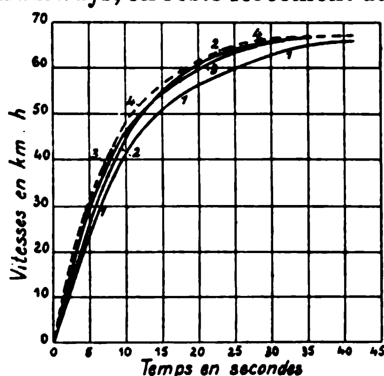


Fig. 840. — Courbes d'accélération d'une automobile électrique de métropolitain de 25 t. à 4 moteurs.

Jusqu'à présent, sur les tramways, on ne dépasse guère un effort accélérateur de 40 à 60 kg. par tonne de poids réel et on ne cherche pas à réaliser la mise en vitesse en moins de 10 à 15 secondes. Sur les métropolitains, on ne descend pas au-dessous de 20 à 40 secondes et le ralentissement jusqu'à l'arrêt se fait dans le même temps ; l'effort accélérateur reste ordinairement, comme nous venons de le dire, inférieur à 55 kg. par tonne de poids réel.

2° *Confort des voyageurs.* — Mais il n'est pas dit qu'on s'en tienne

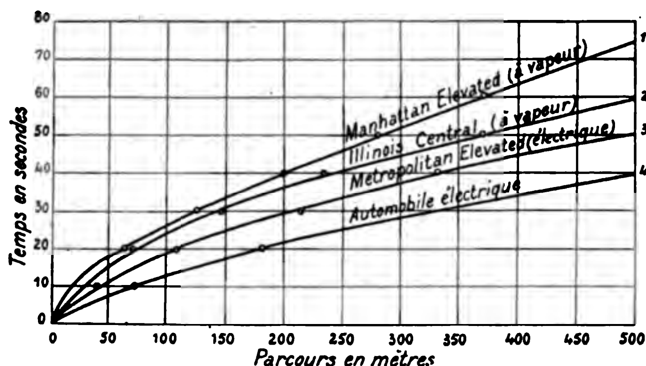


Fig. 841. — Courbes des parcours effectués en fonction du temps par divers matériels de métropolitains électriques et à vapeur.

à ces valeurs et qu'on n'aille pas plus loin sur les réseaux métropolitains. Le système de trains à adhérence totale qui vient d'être appliqué par M. Sprague sur le South Side Elevated de Chicago permet, en effet, de reculer beaucoup les limites actuelles et d'atteindre des accélérations irréalisables avec la traction à va-

peur[1]. L'accélération ne serait plus alors limitée que par le souci de ne pas incommoder les voyageurs. Or, dans des essais effectués à Schenectady[2], M. W. B. Potter a constaté qu'on pouvait atteindre, sans produire d'impression pénible sur les personnes, une accélération de 6 km : h. par seconde ; une automobile de métropolitain équipée en vue de ces essais, pesant 25 t., charge comprise, et munie de 4 moteurs de 50 chev., a pu réaliser sans inconvénient les vitesses indiquées par les courbes de la figure 840 et par le tableau suivant :

TEMPS ÉCOULÉ EN SECONDES	VITESSES ACQUISES EN KM : H.			
	Essai n° 1.	Essai n° 2.	Essai n° 3.	Essai n° 4.
5	22,5	25,7	29	30,5
10	41,8	45	46,5	48
15	49,7	54,6	54,5	56
20	56,2	61	60	61
25	60,3	64,2	63,5	65
30	63,5	65,8	66	»

Un train métropolitain à vapeur ne réalise pas, en général, plus du tiers de ces accélérations, comme le montrent les figures 841 et

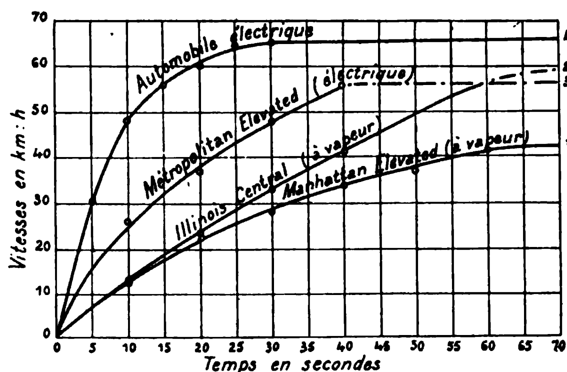


Fig. 842. — Courbes des vitesses réalisées par les matériels de la figure précédente.

842, qui mettent admirablement en évidence l'avantage de la traction électrique sur la traction à vapeur à ce point de vue. On voit qu'au début de l'accélération la locomotive à vapeur a peu d'effi-

[1] La régulation Sprague (p. 263) assure d'ailleurs automatiquement une mise en vitesse parfaitement graduée.

[2] *Engineering News*, 14 octobre 1897, et *Street Railway Journal*, octobre 1897.

cacité : dans les 10 premières secondes, elle n'atteint sur le Manhattan Elevated que 12 km. à l'heure, au lieu de 26 pour le train électrique du Metropolitan Elevated et 48 pour l'automobile électrique qui a servi aux essais de M. Potter; la première donne lieu,

Fig. 843. — Modifications apportées à un parcours par les effets de l'inertie.

Les courbes supérieures sont déterminées comme si le régime était permanent. — Les courbes inférieures sont corrigées en tenant compte de l'inertie. — Les traits pleins se rapportent aux efforts, les traits pointillés aux courants et les traits mixtes aux vitesses.

en outre, à des à-coups dans le commencement de l'accélération, qui ne sont pas marqués sur la figure et qu'évite complètement la traction électrique. Si l'on prend les positions relatives au bout de 10 secondes, on voit que le train métropolitain à vapeur a parcouru 17 m., le train suburbain à vapeur 27,50 m., le train métro-

politain électrique 46 m. et enfin l'automobile électrique isolée 72 m., soit plus du double du second chiffre.

A l'arrêt, la vitesse de ralentissement est limitée de même par le patinage des roues et par les secousses imposées aux voyageurs. On doit donc admettre sensiblement les mêmes valeurs pour l'accélération retardatrice que pour l'accélération au départ ; la plupart du temps, on se contente même de valeurs plus faibles. On trouvera plus de détails sur ce sujet dans le chapitre XV, réservé à l'étude du freinage.

Effets de l'inertie pendant la marche. — Ce n'est pas seulement aux mises en vitesse que l'inertie fait sentir son influence, mais aussi pendant la marche, à chaque changement de la résistance opposée par la voie ; cette inertie ne permet pas au véhicule ou au train de passer brusquement d'un régime de vitesse et de courant à un autre, et elle donne lieu à des périodes intermédiaires d'accélération ou de ralentissement souvent très marquées.

A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous les résultats obtenus pour une portion de parcours d'une voiture de tramway de 12 t. (poids d'inertie 15 t.), équipée avec 2 moteurs dont les courbes de fonctionnement sont données par la figure 568. D'après ces courbes, il est aisé de déterminer les régimes permanents sur chaque tronçon, en supposant qu'on ait d'abord calculé les efforts résistants. On obtient ainsi le tableau suivant, correspondant au tracé supérieur de la figure 843.

COURBES DE MARCHE D'UNE VOITURE DE TRAMWAY EN RÉGIME PERMANENT

SECTION	LONGUEUR en km.	DÉCLIVITÉ p. 100.	EFFORT résistant en kg.	COUPLAGE des moteurs.	VITESSE en km : h.	COURANT en amp.
AB	0,100	0,000	+ 51,7	Série.	16,4	10,5
BC	0,820	1,187	+ 185,9	Parallèle.	22,5	34,8
CD	0,500	4,110	+ 434,5	Id.	18,1	54
DE	0,600	2,144	+ 267,3	Id.	20,6	41,2
EG	0,420	3,012	+ 341	Série.	9	23,3
GH	0,260	4,080	— 261,8	Ouvert.	12	0
HJ	0,400	1,924	+ 248,6	Série.	10	20

Pour déterminer au contraire la véritable série des valeurs de la

vitesse et du courant, il faut faire le calcul des accélérations successives, exactement comme pour le démarrage étudié à la page 534. On trouve ainsi les chiffres consignés dans le tableau ci-contre (p. 563), et on en déduit le tracé des courbes inférieures de la figure 843; celles-ci diffèrent complètement des courbes supérieures.

On verra au chapitre XIV qu'il serait difficile en pratique de faire des calculs aussi détaillés pour les tramways ; mais ils peuvent être utilisés avec avantage pour l'étude des métropolitains.

§ 3. — CONDITIONS PRATIQUES D'APPLICATION

Ayant exposé, dans ce qui précède, les principes fondamentaux de la traction par l'électricité, il nous reste à indiquer rapidement les conditions pratiques de leur application dans les principaux cas où ce mode de traction est dès maintenant utilisé ou utilisable, c'est-à-dire sur les tramways, les métropolitains et les chemins de fer suburbains et d'intérêt local[1].

I. — TRAMWAYS

Caractère du service. — A l'extérieur des villes, les véhicules de tramways peuvent faire sans arrêt de longs parcours, sur lesquels ils atteignent des vitesses de régime. Au contraire, les tramways urbains présentent des conditions d'exploitation extrêmement irrégulières, et l'on peut dire que les voitures s'y trouvent constamment en régime variable, car elles sont soumises à trois causes d'arrêt ou de ralentissement continuelles :

1° *Les accidents du tracé :* à l'entrée des courbes, au passage des aiguilles et des croisements, on doit ralentir en supprimant le courant ; à ces nombreuses causes de ralentissement s'ajoutent, sur les lignes à simple voie, les arrêts nécessaires à chaque garage, qui constituent une sujétion spéciale très gênante; ces ralentissements, qui forcent à manœuvrer continuellement le régulateur, à réaliser des vitesses maxima élevées pour rattraper les retards et à mettre constamment les moteurs en régime d'accélération, c'est-à-dire dans des conditions peu favorables au rendement, diminuent d'une façon très sensible le rendement moyen, en même temps qu'ils occasionnent un accrois-

[1] Nous avons expliqué précédemment avec détails (t. I, p. 500) les motifs qui ne nous permettent pas de considérer l'emploi de la traction électrique comme mûr actuellement pour l'exploitation des grandes lignes. La question des trains à très grande vitesse a été étudiée d'autre part au chapitre VIII et au § 2, III, du présent chapitre (p. 508); nous n'y reviendrons pas ici.

COURBES DE MARCHE RÉELLES D'UNE VOITURE DE TRAMWAY
EN TENANT COMPTE DES EFFETS D'INERTIE.

Section.	Vitesse V en km : h.	Variation de vitesse ΔV en km : h.	Couplage des moteurs.	Courant en ampères.	Effort moteur effectif en kg.	Effort moyen à la jante F en kg.	Effort accélérateur F' = F — R en kg.	Accroissement de vitesse en km : h. par seconde.	Distance nécessaire pour passer d'une vitesse à une autre en mètres.	Parcours total en mètres.	OBSERVATIONS
BC	16,4		Série.	69	632						R = 186 kg. On passe brusquement du couplage en série au couplage en parallèle à la sortie de la ville.
		0,6	Parallèle.			601	415	1,333	7,5		
	17			64	570					7,5	
		1				508,5	322,5	1,035	16,9		
	18			55	447					24,4	
		1				405	219	0,703	26,3		
	19			48,4	363					50,7	
		1				330,5	144,5	0,464	41,9		
	20			43,5	298					92,6	
		1				274	88	0,283	72,5		
	21			39,7	250					165,1	
		1				227	41	0,132	163,3		
	22			36,2	204					328,4	
		0,5				195	9	0,029	385,0		
	22,5			34,8	186					713,4	
CD	22,5		Parallèle.	34,8	186						R = 434,5 kg. La déclivité passe brusquement de 1,187 à 4,11 p. 100.
		— 0,5				195	—239,5	—0,769	14,5		
	22			36,2	204					14,5	
		— 1				227	—207,5	—0,666	32,3		
	21			39,7	250					46,8	
		— 1				274	—160,5	—0,515	39,8		
	20			43,5	298					86,6	
		— 1,5				352	— 82,5	—0,266	107,1		
	18,5			51,7	405					193,7	
		— 0,4				420	— 14,5	—0,047	167,9		
	18,1			54	434,5					361,6	
DE	18,1		Parallèle.	54	434,5						R = 267,3 kg. La déclivité se réduit à 2,144 p. 100.
		0,9				399	131,7	0,425	39,5		
	19			48,4	363					39,5	
		1				330,5	63,2	0,203	96,0		
	20			43,5	298					135,5	
		0,3				289	21,7	0,070	86,7		
	20,3			42,3	280					222,2	
		0,3				273,7	6,4	0,021	298,5		
	20,6			41,2	267,3					520,7	
EG	20,2		Parallèle. Série.		341						Le courant est interrompu pour produire une rapide diminution de la vitesse. Dans ces conditions, l'effort à la jante reste constant ; il est seulement accru de 44 kg. par le frottement des engrenages à vide. On admet que, pendant le ralentissement, la vitesse varie linéairement.
		—11,6	Ouvert.				—385	—1,236	138,9		
	9		Série.	23,3	341	341				138,9	
GH	9		Ouvert.								
		3				—261,8	+217,8	0,609	45,0		
	12		.		261,8					45,0	
HJ	12		Série.	16	147						R = 278,6 kg. Le courant est rétabli, en même temps qu'on passe d'une pente de 4,08 à une rampe de 1,924 p. 100.
		0,5				156	— 92,6	0,297	19,8		
	11,5			16,8	165					19,8	
		0,5				178,5	— 70,1	0,225	25,0		
	11			17,8	192					44,8	
		0,5				205,5	— 43,1	0,138	38,8		
	10,5			18,8	219					83,6	
		0,5				233,8	— 14,8	0,047	107,8		
	10			20	248,6					191,4	

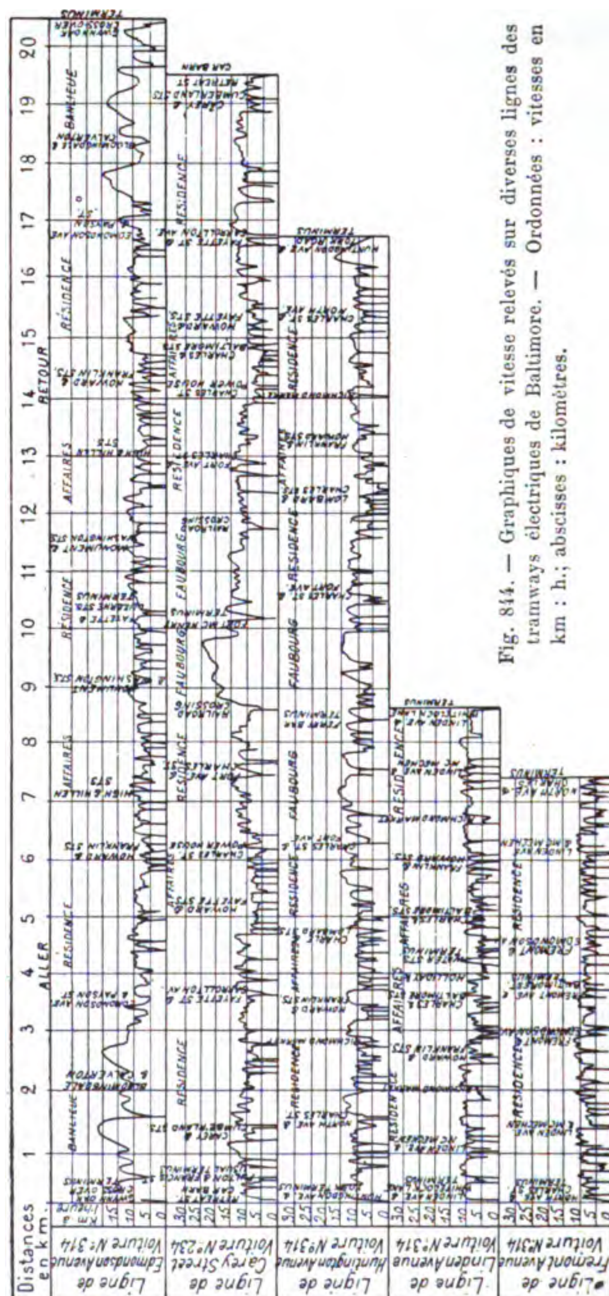


Fig. 844. — Graphiques de vitesse relevés sur diverses lignes des tramways électriques de Baltimore. — Ordonnées : vitesses en km : h.; abscisses : kilomètres.

sement d'usure de tout le matériel électrique soumis à ces régimes variables; aussi ne saurait-on conseiller l'emploi de la simple voie dans les villes où il

existe un trafic sérieux, car l'économie qu'on réalise ainsi sur la construction risque d'être largement compensée par un accroissement des dépenses d'exploitation; pour des raisons analogues, la double voie doit être établie d'une façon très soignée et en vue d'éviter autant que possible tous les ralentissements autres que ceux imposés par le trafic ;

2° *L'encombrement de la voie par d'autres véhicules :* cet encombrement serait assez rare en Amérique, par suite de la grande largeur des voies publiques et de la faible circulation de voitures ordinaires, s'il n'y avait de nombreux croisements de tramways; en Europe, les rues sont très étroites et il y a jusqu'à présent un roulage très actif; les automobiles de tramway sont donc exposées à de fréquents arrêts ou ralentissements ;

3° *Les arrêts pour prendre ou laisser des voyageurs :* tout accroissement du nombre de ces arrêts force, si l'on veut conserver la même vitesse commerciale, à accroître la vitesse de marche et augmente ainsi non seulement le nombre des mises en vitesse, mais encore la dépense d'énergie occasionnée par chacune ; on doit donc, comme nous l'avons déjà signalé (t. I, p. 349), chercher à imposer au public l'habitude des arrêts fixes, au lieu des arrêts à volonté en cours de route qui prévalent encore aujourd'hui presque partout.

RÉSULTATS D'ESSAIS EFFECTUÉS PAR M. HERING SUR LES TRAMWAYS DE BALTIMORE

LIGNE	LONGUEUR EN KM.	VITESSE MOYENNE en km : h.			NATURE de la ligne.	NOMBRE MOYEN d'arrêts par km.	PROPORTION d'arrêts p. 100.		WATTS-HEURES par voiture-kilomètre.	PUISSANCE MOYENNE en kw.	POIDS DES VOITURES en tonnes.	WATTS-HEURES par tonne-km.
		Aller.	Retour.	Aller et retour.			Complets.	Partiels.				
Pikesville Road.	9,28	26,08	31,36	28,64	Suburbaine, accidentée (déclivité maxima, 6 p.100).	1	76	24	500	16,30	7,16	70
Roland Park-City Hall . .	8,24	21,44	21,76	21,60	Suburbaine et urbaine, très accidentée (déclivité maxima, 8 p.100).	2	88	12	730	17,50	6,67	109
Huntington Avenue	8,50	19,20	17,60	18,72	Urbaine, assez accidentée.	4,5	75	25	810	14,70	6,8	119
Linden Avenue.	4,18	16,00	15,04	15,36	Urbaine, peu accidentée.	5	77	23	875	13,30	6,8	128,5

Le nombre des arrêts et la vitesse moyenne varient suivant les quartiers desservis.

La figure 844 et le tableau ci-dessus, qui résument des relevés effectués par M. H. S. Hering sur des voitures en service sur diverses lignes de tramways de Baltimore, donnent une idée précise des conditions réalisées dans une exploitation américaine[1]. Dans les quartiers d'affaires, la vitesse varie entre

[1] Cf. H.S. Hering, « Electric railway tests », *loc. cit.* Les vitesses ont été obtenues par un enregistreur Boyer, les dépenses d'énergie par un compteur Thomson.

8 et 16 km : h., et les arrêts entre 8 et 6 par kilomètre ; dans les quartiers d'habitation bourgeoise, on réalise de 16 à 24 km : h., avec 3,5 à 2,5 arrêts par kilomètre ; enfin, dans les faubourgs et la banlieue, la vitesse s'élève à

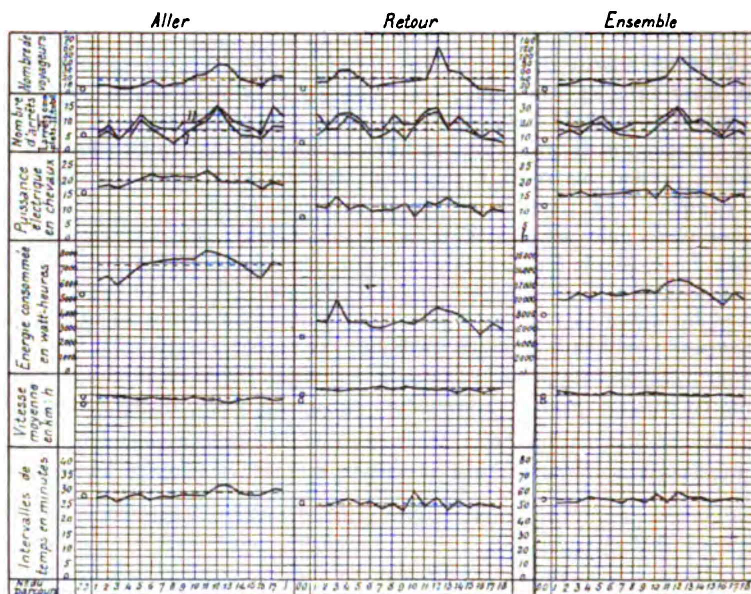


Fig. 845. — Graphique d'une journée de service sur la ligne de Pikesville Road à Baltimore. — Durée, vitesse et puissance moyennes, dépense d'énergie, nombre d'arrêts et de voyageurs pour chaque parcours.

24 et 48 km : h. et le nombre d'arrêts descend à 1,5 ou 0,5 par kilomètre. Le tableau précédent indique les diverses vitesses, les dépenses d'énergie et les nombres d'arrêts pour l'aller, le retour et les deux trajets cumulés ; la vitesse moyenne est naturellement plus grande sur les parcours qui sortent de la ville ; les dépenses d'énergie varient avec le profil, la charge et le nombre d'arrêts.

La figure 845 résume sous forme graphique les valeurs de ces divers



Fig. 846. — Graphique de vitesse relevé comparativement aux précédents sur une ligne de tramway à traction animale de Baltimore.

éléments pour les voyages effectués sur une même ligne, celle de Pikesville Road, pendant une journée de service régulier.

A titre de comparaison, la figure 846 donne un relevé analogue fait sur un tramway à chevaux ; on voit combien les vitesses moyennes sont différentes.

Parmi les arrêts, les uns ne sont que partiels et consistent simplement en

une diminution de la vitesse au-dessous de 5 km : h. M. Heriug a compté sur les diverses lignes qu'il a expérimentées les nombres d'arrêts partiels et totaux pendant une journée de service normal et a trouvé les chiffres portés au tableau de la page 565 (aller et retour).

Ces chiffres représentent des moyennes applicables à la plupart des lignes de tramways américaines ; celles de Baltimore sont très accidentées, ce qui explique les consommations assez fortes relevées.

En Europe, les conditions sont différentes en ce que les vitesses sont plus faibles, puisqu'on ne dépasse guère une vitesse commerciale, arrêts compris, de 10 ou 12 km : h. ; mais le caractère de l'exploitation reste le même : les arrêts motivés par les voyageurs sont à peu près aussi nombreux ; les mises en marche durent, comme en Amérique, environ 15 à 20 secondes, et, pendant la marche elle-même, les voitures sont presque constamment en état d'accélération ou de ralentissement ; à chaque aiguille ou entrée de courbe, le mécanicien réduit ou même supprime le courant comme aux arrêts. La figure 847, qui représente un diagramme de courant en fonction du temps relevé sur la ligne de Fontainebleau [1], qui est à une seule voie, donne un exemple type de ces conditions pratiques de marche. Les courbes enregistrées sur les voitures à accumulateurs de Paris-Saint-Denis (p. 389) sont du même genre.

Dans de pareils cas, 50 p. 100 environ de la puissance totale nécessaire sont absorbés par les démarrages et les rampes, 25 p. 100 par la résistance de l'air et les frottements en courbe et 25 p. 100 seulement par l'effort de traction normal.

On trouvera plus loin (chap. XIV, § 3) des résultats expérimentaux détaillés relatifs aux rendements et aux dépenses d'énergie, qui sortent du cadre du présent paragraphe.

Difficultés d'un service de traction accéléré. — Quand on analyse les courbes de vitesse de la figure 844 relatives à un tramway américain typique, on constate immédiatement que la vitesse de régime que tendent à prendre les moteurs dans les faubourgs ou la banlieue, où les arrêts sont espacés, est en général trop élevée et dépasse la vitesse réglementaire ; aussi le mécanicien est-il obligé d'interrompre périodiquement le courant pour ne pas atteindre cette vitesse de régime, ce qui est défavorable à la conservation des régulateurs [2].

Il est évident que des moteurs ainsi employés consomment pendant la période d'accélération plus de courant qu'il n'est nécessaire en régime ; ce fait, joint à la vitesse entre arrêts plus grande dans les villes américaines que dans celles de l'ancien monde, explique la différence entre les chiffres de consommation aux États-Unis et en Europe qu'on trouvera au chapitre XIV. Aussi, sur telle ligne parisienne, où des moteurs américains ont été introduits sans modi-

[1] Nous devons ce graphique à l'amabilité de M. Pirani.

[2] En Angleterre, le nouveau règlement du Board of Trade qu'on trouvera en annexe impose même l'emploi sur les voitures électriques d'un régulateur à force centrifuge qui interrompt automatiquement le courant dès que la vitesse dépasse 16,1 km : h. (10 milles). Dans les villes, la vitesse limite est réduite à 12,8 km : h. (8 milles) ; mais cette réglementation pourrait être remplacée plus simplement par l'obligation de rester sur les touches en série. La fréquence des arrêts dans la partie urbaine d'un parcours n'empêche pas toujours d'atteindre des vitesses exagérées.

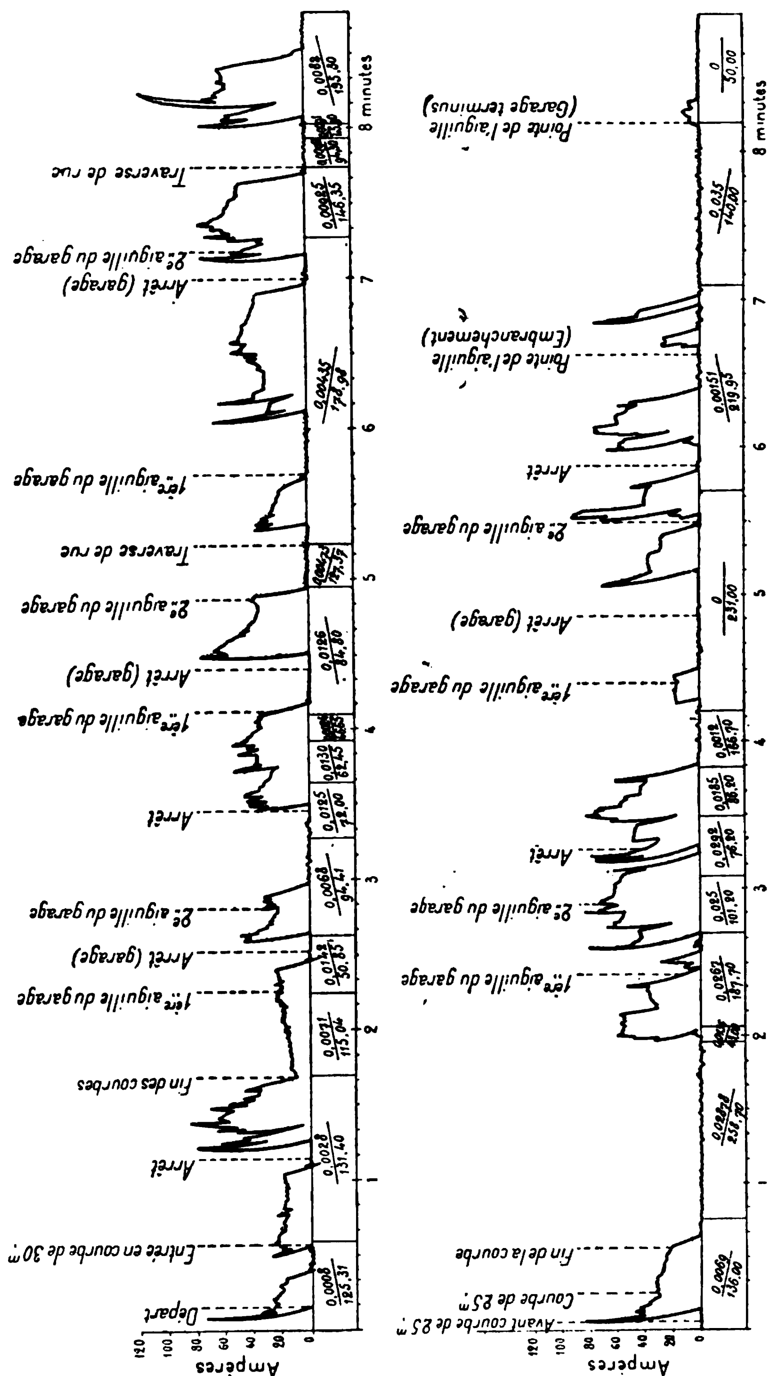


Fig. 847. — Graphique de courant en fonction du temps relevé sur le tramway de Fontainebleau.

fication en remplacement de moteurs moins robustes, mais à moindre vitesse de régime, a-t-on vu la consommation moyenne augmenter de 2 ou 3 ampères par voiture et a-t-on été obligé de leur adjoindre des résistances fixes en série ; sur d'autres lignes françaises, on a obtenu le même résultat en plaçant un butoir sur les régulateurs pour empêcher l'emploi des touches qui mettent les moteurs en parallèle ; mais ce sont là de déplorables expédients et le vrai remède eût consisté à augmenter le nombre des spires d'induits.

En dehors de la question d'économie d'énergie, la grosse difficulté de la traction sur les tramways, c'est la réalisation d'une vitesse commerciale suffisante. Avec des arrêts aussi nombreux qu'ils le sont sur les lignes urbaines, il faudrait, pour obtenir des vitesses commerciales de plus de 12 km : h., admettre comme en Amérique des vitesses maxima supérieures à celles fixées par nos règlements (t. I, p. 103, et t. II, p. 600) et véritablement dangereuses. Il vaut mieux chercher à réduire le nombre des arrêts et leur durée, laquelle ne devrait pas dépasser 20 secondes ; dans ce but, il y aurait lieu de supprimer partout où il existe le système du contrôle des correspondances aux stations et d'éviter l'emploi des impériales.

D'autre part, on doit chercher à accroître l'accélération jusqu'à la limite permise par le confort des voyageurs (p. 558). Sur les petits réseaux, il faut éviter d'exagérer ainsi la puissance demandée aux machines de la station ; l'emploi d'une batterie d'accumulateurs en dérivation sur le réseau (p. 538), constitue dans ce cas la véritable solution du problème. C'est cette nécessité de l'accélération rapide qui justifie d'ailleurs l'emploi des moteurs relativement très puissants qu'on adapte aujourd'hui aux tramways. Nous ne reviendrons pas ici sur les détails que nous avons donnés plus haut au sujet du choix du nombre et du type de ces moteurs (voir t. I, p. 97).

Lorsqu'il s'agit de tramways à accumulateurs, le problème est plus difficile, puisque l'accroissement de puissance des moteurs entraîne forcément une augmentation de la capacité et du poids de la batterie. Un des points de réelle infériorité de ce système par rapport à celui à alimentation extérieure est la limitation du pouvoir accélérateur par le débit maximum de la batterie (voir plus haut, p. 514). Il est donc rationnel de se contenter pour les tramways à accumulateurs de mises en marche plus lentes que pour les tramways à fil aérien et d'adopter une vitesse commerciale un peu plus faible.

Divers modes d'exploitation. — Il y a deux modes d'exploitation usités pour les tramways : l'un consiste à employer des automobiles isolées, l'autre à avoir des trains composés d'une automobile et d'une ou plusieurs voitures remorquées. En général, sauf sur les réseaux à très fortes rampes, ce dernier système est admissible au point de vue de l'adhérence, bien qu'il force à prendre quelques précautions au démarrage pour éviter le patinage ; il présente un grand avantage au point de vue de l'économie, par suite du poids mort relativement faible des voitures d'attelage et de leur coefficient de traction réduit. On peut admettre, en général, qu'en ajoutant à une automobile une voiture d'attelage de même capacité, on n'augmente pas de plus de 50 p. 100 la dépense d'énergie nécessaire, ni les frais de personnel ; on n'accroît pas d'ailleurs sensiblement les frais d'entretien des moteurs. L'emploi de voitures d'attelage ouvertes permet en outre de supprimer l'impériale là

où elle existe et d'accélérer la montée et la descente des voyageurs, ce qui a pour effet de réduire la durée des arrêts et d'accroître ainsi la vitesse commerciale.

Au point de vue de la facilité d'accès aussi bien que du travail nécessaire à la traction, les grandes voitures à bogies sont inférieures aux trains de deux voitures ordinaires, à capacité égale. Nous avons déjà traité le premier de ces points avec détails à propos du choix des voitures (t. I, p. 352) et n'y reviendrons pas ; le second sera examiné d'après les résultats d'expériences au chapitre XIV, § 3 ; il nous suffira de dire ici que des relevés faits à Saint-Louis ont donné pour la consommation par place offerte de voitures à bogies des chiffres de 30 p. 100 plus élevés que pour des trains de voitures à deux essieux; sur le réseau de la Consolidated Traction Co. du New Jersey, on a trouvé des différences presque aussi fortes.

On doit donc recommander l'emploi des trains de deux voitures de préférence à celui des voitures longues à quatre essieux, *toutes les fois que le trafic justifie une augmentation du nombre de places offertes par unité de transport;* mais il faut se garder, en général, comme nous l'avons fait ressortir au chapitre VI (p. 347), d'accroître la capacité de ces unités aux dépens de la fréquence des départs.

Sur les lignes à accumulateurs, on doit se préoccuper plus encore qu'ailleurs de réduire au minimum la puissance nécessaire par place offerte; il est donc particulièrement désirable d'y employer des voitures d'attelage, malgré l'accroissement du poids de la batterie qui en résulte. Il va sans dire que cette batterie doit en général être placée sur l'automobile, si l'on veut profiter de son poids pour accroître l'adhérence. Cette solution est celle qui est adoptée aujourd'hui sur tous les tramways à accumulateurs.

II. — Chemins de fer métropolitains

Conditions de la traction électrique sur les lignes métropolitaines. — Les chemins de fer urbains donnent lieu à un service analogue à celui des tramways, mais moins défavorable à deux points de vue : il n'y a que des arrêts fixes, et la voie n'impose que très peu de ralentissements en cours de marche.

Sur les lignes métropolitaines souterraines ou aériennes, les stations sont relativement très rapprochées : leur distance ne dépasse guère 1 km. et s'abaisse souvent au-dessous de 500 m.; sur les « Elevated » des grandes villes américaines, par exemple, l'intervalle entre stations varie entre 450 et 900 m. et est en moyenne de 700 m.; sur le métropolitain souterrain de Budapest, il n'est que de 300 m. comme sur les tramways à niveau du sol. Les arrêts sont donc fréquents (toutes les 1,5 à 2 minutes) et l'on doit cependant réaliser une vitesse commerciale relativement élevée (20 à 25 km : h.), ce qui nécessite une dépense de puissance proportionnellement bien plus considérable que sur les grandes lignes.

On aura une idée pratique de ce genre de service en considérant comment sont exploitées actuellement les lignes analogues à vapeur.

Sur le Manhattan Elevated R. R. de New York, par exemple, le train normal est formé de 5 voitures de 14,65 m. de longueur, pesant chacun 20 t. avec

une charge de 75 personnes, et d'une locomotive de 23,5 t., ce qui porte à 123,5 t. le poids total du train et à $\frac{20}{123,5} = \frac{1}{6,1}$ le rapport du poids mort de la locomotive au poids total. Les machines ont un poids adhérent de 15,25 t., soit 65 p. 100 de leur poids, ce qui leur permet de réaliser pour l'accélération un effort maximum de 3 000 à 3 500 kg. à la jante, en supposant un coefficient d'adhérence de 0,20 à 0,23 [1]. La période d'accélération dure 50 à 60 secondes; la vitesse maxima atteinte est de 32 à 40 km : h., la puissance maxima développée de 300 chev. et la vitesse commerciale de 21,8 km : h.

Sur le District Railway de Londres, ligne souterraine où les machines peuvent être plus lourdes, on emploie des trains de 9 voitures, pesant 88 t. et traînés par une locomotive de 47 t. présentant un poids adhérent de 36 t. et un effort maximum de 32 kg. par tonne; la vitesse moyenne entre arrêts est de 27 km : h., la vitesse commerciale de 18 km : h. et l'effort maximum de 4 500 kg.

Ces données et celles relatives à d'autres exploitations du même genre, à vapeur ou électriques, sont résumées dans le tableau des pages 572 et 573.

La figure 839 (p. 556) représente approximativement les variations relatives de l'effort et de la puissance sur un train suburbain de l'Illinois Central R. R. aux abords de Chicago.

La traction électrique doit permettre de remorquer des trains équivalents à ceux que traînent actuellement les locomotives à vapeur sur les lignes que nous venons de citer.

Pour que la substitution présente tous ses avantages, on doit d'ailleurs chercher à satisfaire par la même occasion aux trois desiderata suivants :

1° Réduire la durée des stationnements au minimum; les arrêts sur les « Elevated » américains durent en moyenne 13 secondes, et ceux du District Railway de Londres, 25 secondes; il semble qu'en France on n'ait pas la même notion de la célérité, car, pour des services analogues, on compte 30 à 45 secondes d'arrêt ;

2° Accroître autant que possible la vitesse entre stations : elle doit pouvoir atteindre 35 à 40 km : h. au moment du maximum;

3° Abréger la période des mises en vitesse et celle des ralentissements par l'emploi des freins. Comme on l'a vu au § 2 (p. 546), un train de métropolitain ne peut guère mieux réaliser sa vitesse de régime permanent qu'une voiture de tramway, car à peine a-t-il franchi quelques centaines de mètres pendant la période d'accélération qu'il faut appliquer les freins pour l'arrêter ; aussi l'objectif principal d'un service métropolitain est-il encore la réalisation d'une accélération très rapide; celle-ci est d'autant plus nécessaire et en même temps plus onéreuse pour l'exploitation que la vitesse commerciale doit être plus élevée.

En outre, l'emploi régulier des freins entraîne la perte presque complète du travail d'accélération.

On aura une idée de l'importance du travail perdu dans une exploitation de métropolitain en se reportant aux courbes de vitesse des figures 835 et 836

[1] Comme nous l'avons déjà dit, le climat sec des États-Unis permet d'y adopter des chiffres d'adhérence plus élevés qu'en Europe.

DONNÉES PRATIQUES RELATIVES A LA TRACTION SUR DIVERSES LIGNES MÉTROPOLITAINES

	LIVERPOOL OVERHEAD RAILWAY	CITY AND SOUTH LONDON RY.	MANHATTAN RAILWAY de New York.	DISTRICT RAILWAY de Londres.	GREAT NORTHERN RAILWAY Trains suburbains.	CENTRAL LONDON RAILWAY	METROPOLITAN WEST SIDE ELEVATED RY. de Chicago.	SOUTH SIDE ELEVATED RY. de Chicago.	STADTBAHN de Berlin.
Mode de traction.	Électrique.	Électrique.	A vapeur.	A vapeur.	A vapeur.	Électrique	Electrique.	Électrique.	A vapeur.
Nombre moyen de voitures à voyageurs par train. . . .	2 (ou 3)	3		9		7	3 à 4	6	8 à 10
Poids de l'équipement électrique ou de la locomotive en t.	6,4	10,5	23,5	46,9	54,3	35,5	4	18	34,1
Nombre de moteurs par train.	2 (1 par voiture.)	2 (sur la locomotive.)				4 (sur la locomotive.)	2 (sur l'automobile).	12 (2 par voiture.)	
Poids du train vide en tonnes.	31,6	31,8		135,2					50 à 60
Nombre de places par train .	114	96	240	400	414	336	120 à 160	250	380 à 480
Poids de moteurs ou de locomotive par voyageur en kg.	56,7	109,4	98,5	117,3	132	105,7	33 à 25	72	90 à 71
Poids du train chargé avec toutes les places occupées en tonnes.	38,9	37,9	106	159,9	191,4	106,5	70 à 100	140	90 à 100
Rapport du poids de moteurs ou de locomotive au poids du train chargé (non compris les moteurs ou la locomotive).	0,20	0,38	0,29	0,41	0,40	0,33	0,06 à 0,04	0,15	0,64 à 0,54
Poids moyen des voitures vides (non compris les moteurs) par place en kg. . .	222	222	279	220	268		530		
Poids du train complet par voyageur en kg.	341	395	441	399	463	316	625	560	230 à 280
Poids sur les roues motrices (toutes places occupées) en tonnes	13,9	10,5		36,2		35,5	17	81	23,1
Rapport du poids sur les roues motrices au poids total du train	0,36	0,28		0,19		0,25	0,24 à 0,15	0,58	0,25 à 0,23
Effort adhérent (1/7 du poids sur les roues motrices) par tonne de train en kg. . .	52	41		28		47	30 à 20	82	37 à 33

Effort de traction total en kg.						6 350			
Effort de traction par tonne de train en kg. — Moyen. . . .		5,9							
Effort de traction par tonne de train en kg. — Maximum . .	55	23		32,2					
Effort maximum de traction par tonne de moteurs ou de locomotive en kg.	331	83		106,2		180,1			100
Vitesse commerciale, arrêts compris, en km. à l'heure.	20,3 (avec arrêts de 23 sec.)	18,5	19,3	18 (cercle intérieur).		23,3 (avec arrêts de 20 sec.)	20	24 à 29	25
Vitesse maxima en km : h. .		45						60	45
Distance moyenne entre les stations en mètres	686	1 006	500	800		870		700	1 130
Durée moyenne des arrêts aux stations en secondes			13	25				10	
Parcours journalier en km. .		1 792 (pour les 6 derniers mois de 1892)		7 702					
Consommation de combustible par train-km. parcouru en kg..	4,79	7,90	11,84 chauffage compris	8,63					
Intervalle entre les trains en minutes.	5		1 1/4 au minimum	2 au minimum		2 1/2			
Nombre de trains par heure.	12	14 à 16							
— par jour. .									160
Longueur totale exploitée en km.	10,000	5,075		62,27		10,460			15,460
Déclivité maxima	2,5 p. 100	R. de 3,3 p. 100 P. de 6,6 p. 100	2 p. 100.	0,7 p. 100					1,1 p. 100
Rayon minimum des courbes en mètres.	140	42,70	27	160					280
Energie moyenne consommée par train-km. en kilowatts-heures	16,7 (moteurs d'atelier, freins, signaux et éclairage compris.)	15,4 (éclairage pendant tout le jour compris.)							
Coût de la traction par train-km. en francs.	0,222 (signaux et éclairage compris.) (pour le mois d'août 1893.)	0,376 (éclairage compris.) (pour les 6 derniers mois de 1893)	1,46 (en 1892)	0,532 (en 1897).					
Prix du charbon en francs par tonne	7,35	22		20 à 25					

(p. 548), qui représentent des résultats relevés sur un train du Metropolitan West Side Elevated R. R. [1], de Chicago, entre deux stations distantes de 750 m.

Supposons que le train considéré pèse 100 t., que la voie soit en palier et que le coefficient de traction moyen soit de 4 kg : t.; la vitesse au moment où l'on applique les freins, soit au bout de 75 secondes (550 m.), est de 38,60 km : h. ou environ 11 m : s.; l'arrêt se fait en 200 m. L'énergie dépensée sur le parcours de 550 m. est ainsi $\frac{100 \times 1\,000}{2 \times 9,81} \times 121 + 550 \times 100 \times 4 =$ 837 000 kgm. De cette énergie la partie disponible sous forme de puissance vive, c'est-à-dire 617 000 kgm., est détruite pendant l'arrêt, 80 000 kgm. étant absorbés par les résistances et 537 000 kgm. par les freins. On voit ainsi le rôle prépondérant que joue l'accélération.

Cette importance relative est encore accrue si l'on considère non plus le travail effectué, mais l'énergie électrique consommée correspondante.

L'inertie de l'armature des moteurs joue dans la force vive des voitures motrices le même rôle que sur les tramways; en valeur absolue, l'effet est même plus important, à cause des vitesses plus grandes réalisées; mais, rapportée au poids *total* du train, l'augmentation de poids apparent est plus faible que sur une automobile de tramway.

Par exemple, sur le Metropolitan West Side Elevated, les armatures pèsent chacune environ 700 kg. et ont un diamètre de 0,46 m.; à la vitesse de 800 tours par minute, correspondant à 40 km : h., la puissance vive de l'armature est d'environ 6 300 kgm., soit en tout 12 600 kgm. pour une voiture. Cette énergie devant être absorbée rapidement par les freins à chaque arrêt, il en résulte sur les dents d'engrenages des pressions d'autant plus intenses que l'action des freins est plus rapide.

Pour réduire les efforts et la consommation d'énergie, aussi bien au démarrage qu'à l'arrêt, M. Greathead avait imaginé, sur le City and South London Railway, d'établir des plans inclinés en sens inverse de 8 mm : m. aux abords de chaque station : à l'arrivée d'un train, sa vitesse s'amortit ainsi sur une rampe, et au départ, sa mise en marche est favorisée par une pente. Cette disposition ingénieuse et éminemment rationnelle a été imitée sur le Central London Railway, où il y a une pente de 30 mm : m. de chaque côté des stations, et on pourra l'employer avec avantage dans tous les cas où elle ne compliquera pas trop la construction de la ligne, comme par exemple sur les chemins de fer tubulaires.

Ainsi que nous l'avons dit déjà souvent, le moteur électrique se prête mieux qu'aucun autre à la réalisation d'accélérations très rapides; mais on est quelquefois gêné pour en développer les qualités autant qu'on le voudrait sur les chemins de fer urbains, par suite des sujétions spéciales de leur établissement. Sur les voies aériennes, en effet, la charge par essieu est limitée par la résistance de la structure [2]; la puissance des voitures motrices se trouve ainsi restreinte en même temps que leur poids adhérent; on verra cependant qu'il

[1] D'après M. H. Gerry, Jr., « Electric traction », *Trans. Am. Inst. El. Eng.*, juillet 1897.

[2] Sur les « Elevated » américains, par exemple, on ne peut dépasser un poids de 9 à 10 t. par essieu pour les locomotives.

ne faut pas exagérer la portée de cette observation. Sur les lignes souterraines, ce n'est plus le poids, mais le gabarit qui est limité, et l'on peut se trouver obligé, faute de place pour loger les moteurs, de renoncer à l'emploi de voitures automobiles ou locomotrices et de recourir à des locomotives séparées.

Il y a, par suite, trois solutions différentes à examiner pour les métropolitains : traction par automobiles ou locomotrices remorquant des voitures ordinaires, trains entièrement formés d'automobiles et enfin traction par locomotives. Nous allons les passer successivement en revue en commençant par la plus répandue, qui est la première.

Emploi de trains mixtes formés de voitures automobiles et de voitures ordinaires. — Ce système n'est qu'une extension du mode d'exploitation généralement adopté sur les tramways. Le métropolitain de Budapest, qui n'est, en somme, qu'un tramway sous chaussée, établit du reste un intermédiaire entre les deux procédés et démontre pratiquement qu'un matériel de tramway peut, presque sans changement, se prêter à l'exploitation d'un chemin de fer urbain.

Il est d'ailleurs facile de s'en rendre compte a priori en remarquant que l'effort de traction moyen, déduction faite des accélérations, est incomparablement plus faible sur un métropolitain que sur un tramway accidenté. Les

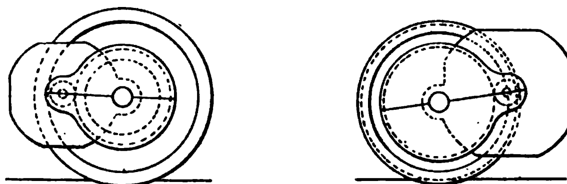


Fig. 848. — Dispositions comparatives des moteurs à engrenages employés sur les tramways et sur les métropolitains.

déclivités atteignent couramment 2 et 3 p. 100 sur les tramways, tandis qu'elles dépassent rarement 0,5 à 1 p. 100 sur les chemins de fer; le coefficient de traction sur les premiers, munis de rails à ornière sales et présentant des courbes de petit rayon, atteint aisément 10 à 15 kg. par tonne, tandis que sur les seconds, à rails Vignole plus propres et à courbures plus douces, il ne dépasse guère 3 à 5 kg. Tout compte fait, au lieu de 15 à 20 kg. par tonne d'effort *moyen* sur un tramway, le matériel roulant n'exige guère sur un chemin de fer urbain que 5 à 10 kg., et le surplus de la puissance des moteurs pourrait suffire à réaliser le supplément d'accélération nécessité par l'accroissement de la vitesse[1].

Mais, en fait, le matériel roulant ordinaire des métropolitains électriques, dont nous avons donné plus haut des exemples (t. I, p. 371), est notablement plus lourd que celui des tramways ; il se rapproche plutôt du matériel des chemins de fer, et exige par conséquent des moteurs plus puissants ; ces derniers sont d'ailleurs faciles à loger dans le truck quand on dispose du gabarit ordinaire et de la voie normale. Pour augmenter le diamètre extérieur des mo-

[1] En supposant qu'on modifie au besoin le bobinage des moteurs pour les adapter à la nouvelle vitesse.

TYPES DE TRAINS LÉGERS DE LA C[ie] WALKER POUR MÉTROPOLITAINS AÉRIENS

		TRAIN n° 1.	TRAIN n° 2.	TRAIN n° 3.
VOITURE LOCOMOTRICE	Poids de la caisse en tonnes	10	10	10
	— des 2 bogies —	10	10	10
	— des 2 moteurs —	7	5,5	3,5
	— de 75 voyageurs —	5	5	5
	— total —	32	30,5	28,5
	Poids adhérent —	19,5	18	16
	Nombre des moteurs	2	2	2
	Puissance commerciale[1] de chacun en chev.	200	125	50
	Effort de traction temporaire correspondant pour tout l'équipement en kg.	5 000	2 560	1 500
	Puissance normale de l'équipement en régime permanent en chev.	100	60	25
	Effort de traction permanent correspondant en kg.	1 600	725	320
	Effort maximum permis par l'adhérence en kg.	4 400	4 100	3 600
	Rapport des deux efforts précédents	0,36	0,18	0,08
TRAIN COMPLET	Nombre de voitures locomotrices.	1	1	1
	— remorquées	2	1	0
	Vitesse maxima de régime en palier en km : h.	50	50	42
	Vitesse commerciale avec arrêts tous les 550 mètres en km : h.	26,5	25,5	24
	Poids de la locomotrice avec 75 voyageurs en tonnes.	32	30,5	28,5
	Poids des voitures remorquées en tonnes.	32	16	»
	— de 150 voyageurs en tonnes.	10	5	»
	— total en tonnes	74	51,5	28,5
	Rapport du poids adhérent au poids total.	0,26	0,35	0,56
	Effort accélérateur maximum en kg.	4 400	2 560	1 180
	Rapport de cet effort à celui permis par l'adhérence	1	0,62	0,41
	Effort d'accélération par tonne en kg.	59,5	49,6	41,4
	Puissance maxima nécessaire pour l'accélération uniforme en chev.	412	280	122
	Courant maximum correspondant en amp.	780	500	220
	Durée de l'accélération en secondes.	34	37,5	36,5
	Parcours pendant l'accélération en mètres	275	290	246
	Effort normal en régime permanent à la vitesse maxima en kg.	590	453	324
	Puissance correspondante en chev.	106	115	51
	Coefficient de traction corresp. en kg : t.	7,95	8,90	11,4
	Effort maximum négatif produit par les freins en kg.	6 250	5 000	2 400
	Durée du ralentissement en secondes.	16	16	14,5
	Parcours correspondant en mètres.	116	119	93

[1] Régime forcé pouvant être soutenu pendant 1 heure sans que l'échauffement dépasse 75° C. au-dessus de la température ambiante.

teurs à simple réduction, on peut même au besoin placer leur axe plus haut que l'essieu, comme le montre la figure 848 qui représente comparativement un moteur de tramway et un moteur de métropolitain. On trouvera aux annexes du tome I la description de quelques types récents de ces moteurs spéciaux [1].

Exemples. — Les voitures locomotrices les plus employées actuellement, qui sont analogues au type de la figure 415 (t. I, p. 466), comportent deux bogies à 2 essieux. On pourrait, en rendant les 4 essieux moteurs, obtenir un poids adhérent égal au poids total et un effort accélérateur égal au 1/5 de ce poids; mais on n'a pas besoin, en général, d'un effort aussi considérable, et l'expérience montre que 2 essieux moteurs par voiture suffisent sur les lignes à voie découverte, où l'adhérence est bonne et où l'on peut employer des trucks élevés et, par suite, des moteurs puissants. On obtient ainsi un poids adhérent d'environ 60 p. 100 du poids de l'automobile (y compris le poids des moteurs) et un effort de traction maximum égal à 12 p. 100 de ce poids. L'emploi de 2 moteurs seulement simplifie l'équipement électrique et la régulation ; dans le but de faciliter les réparations, on réunit généralement ces 2 moteurs sur le même truck, en conservant à l'autre extrémité de la voiture un bogie ordinaire.

L'adoption de locomotrices de ce type permet de remplacer, comme nous l'avons dit, le mécanicien et le chauffeur par un seul agent, et par suite, avec le même personnel, d'augmenter le nombre des trains en les faisant plus légers; ce sont alors de véritables trains-tramways, pour lesquels il suffit d'une seule voiture locomotrice remorquant 2 ou 3 voitures d'attelage.

Plusieurs grandes compagnies de construction américaines établissent des trains électriques légers de ce genre. M. S. H. Short, en particulier, a étudié pour la Cie Walker un matériel très bien conçu qui mérite d'être cité comme modèle; il comprend trois types de trains, dont le tableau de la page 576 résume les données principales et le tableau suivant les conditions de fonctionnement en régime permanent à 500 volts :

	TRAIN N° 1					TRAIN N° 2					TRAIN N° 3				
	Sur rampe de				Pendant l'accélération.	Sur rampe de				Pendant l'accélération.	Sur rampe de				Pendant l'accélération.
	0	1	2	3		0	1	2	3		0	1	2	3	
Courant consommé en amp.	190	290	400	505	780	175	250	320	390	500	90	124	154	182	220
Puissance en chev.	107	172	237	299	412	93	139	178	222	280	51,5	69	86	102	122
Vitesse en km : h.	51,2	35,3	33,4	30,5	0-51,2	48,4	39,8	34,2	32,0	0-48,4	41,8	31,2	27,6	24,7	0-41,8
Effort de traction en kg.	590	1 260	1 930	2 600	4 400	460	945	1 390	1 870	2 560	322	580	825	1 100	1 180

[1] C'est à M. *Baker*, l'éminent directeur du Metropolitan West Side R. R. de Chicago, qu'appartient la création du premier service de ce genre, celui de l'« Intramural » de l'Exposition de 1893.

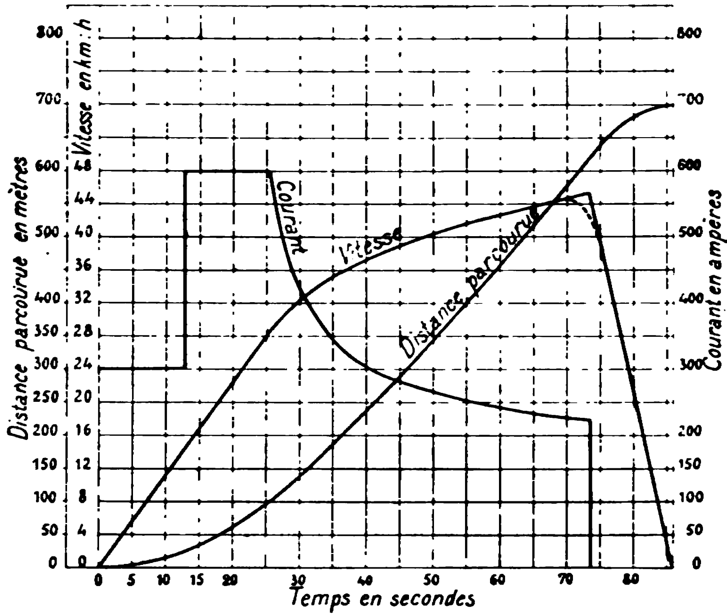


Fig. 849. — Courbe type de marche d'un train Walker de 80 t. à 4 voitures, équipé avec 2 moteurs de 200 chev.

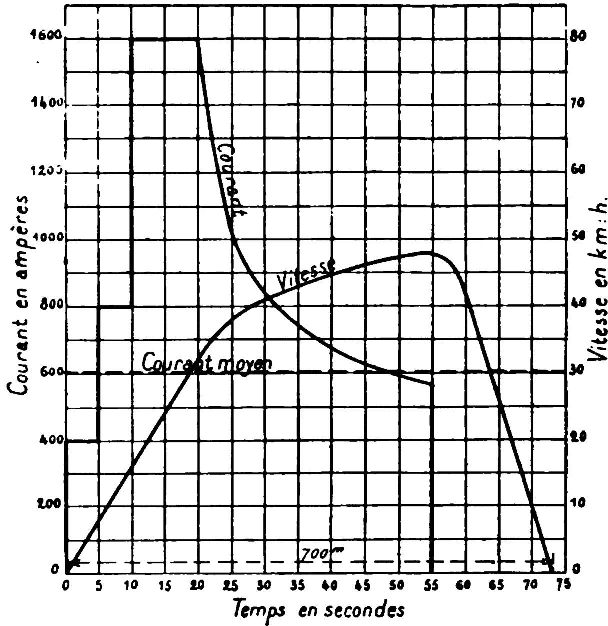


Fig. 850. — Courbe type de marche d'un train Walker de 140 t., équipé avec 4 moteurs de 200 chev.

Les figures 849 et 850 représentent les conditions de marche calculées de deux trains métropolitains types équipés avec 2 et 4 moteurs de 200 chev. Le premier, formé de 4 voitures et pesant 80 t. en charge, présente le même effort accélérateur que le n° 1 du tableau ci-dessus. Le second pèse 140 t. et démarre avec un effort de 8 000 kg.; la vitesse croît rapidement pendant 55 secondes, au bout desquelles on applique les freins pour arrêter à la station suivante, distante de 700 m.

La General Electric Co. et la Westinghouse Electric Co. ont établi des matériels analogues qui fonctionnent sur plusieurs chemins de fer urbains.

Le tableau suivant, qui résume des expériences de M. Gerry, déjà citées plus haut, sur le Metropolitan West Side Elevated R.R. de Chicago, donne une idée des résultats pratiques obtenus et peut servir d'exemple pour un projet d'exploitation de métropolitain électrique :

N° DE L'ESSAI	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de voitures par train .	4	4	4	3	3	2	2	4
Poids approximatif du train en t.	100	100	100	75	75	50	50	100
Durée totale d'un parcours. . .	28m 26s	29m 3s	28m 30s	28m 37s	27m 26s	25m 30s	23m 48s	32m 44s
Durée totale des arrêts	2m 19s	2m 5s	2m 42s	1m 47s	1m 16s	0m 54s	1m 22s	1m 41s
Temps de marche.	2m 67s	26m 58s	25m 58s	26m 50s	26m 10s	24m 36s	22m 26s	3m 13s
Vitesse commerciale (arrêts compris) en km : h..	21,1	20,8	21	22,3	23,1	24,0	25,5	18,5
Vitesse moyenne en dehors des arrêts en km : h.	23,5	22,5	23,2	23,6	24,2	24,6	27	19,6
Courant moyen (arrêts compris) en ampères.	138,3	142,6	138,6	130,2	129,5	90,1	106,6	101,1
Courant moyen en dehors des arrêts en ampères.	148,7	153,2	151,8	137,4	135,6	92,5	112,4	106,4
Voltage moyen au train en volts.	504	498	503	512	516	521	529	509
Rendement moyen entre les bornes des génératrices et la jante des roues	0,51	0,505	0,52	0,50	0,51	0,515	0,50	0,473
Consommation d'énergie du train par train-km. en kw.-h. .	0,82	0,845	0,82	1,05	1,01	0,985	0,095	0,68
Consommation d'énergie à la station par train-km. en kw.-h.	0,895	0,945	0,895	1,125	1,045	1,04	1,05	0,75
Dépense par tonne-km. en w.-h.	82	84,5	82	»	»	»	»	68

Ces essais ont été faits par un temps moyen, sur voie sèche (ligne de Logan Square) et dans des conditions normales de service. La ligne empruntée présente une déclivité maxima de 0,75 p. 100 sur 700 m. environ dans un sens et sur 580 m. dans l'autre; les autres déclivités ne dépassent pas 0,03 p. 100 et sont très courtes.

Sur l'ensemble du réseau (29 km.), la dépense moyenne, d'après M. Baker, est de 77 w.-h. par tonne-kilomètre; les consommations correspondantes sont de 1,71 kg. de charbon (médiocre) et 8,6 kg. d'eau par kw.-h. produit. On estime à 46 p. 100 l'économie de combustible réalisée par la traction électrique.

La figure 851 reproduit les graphiques obtenus sur une partie du trajet;

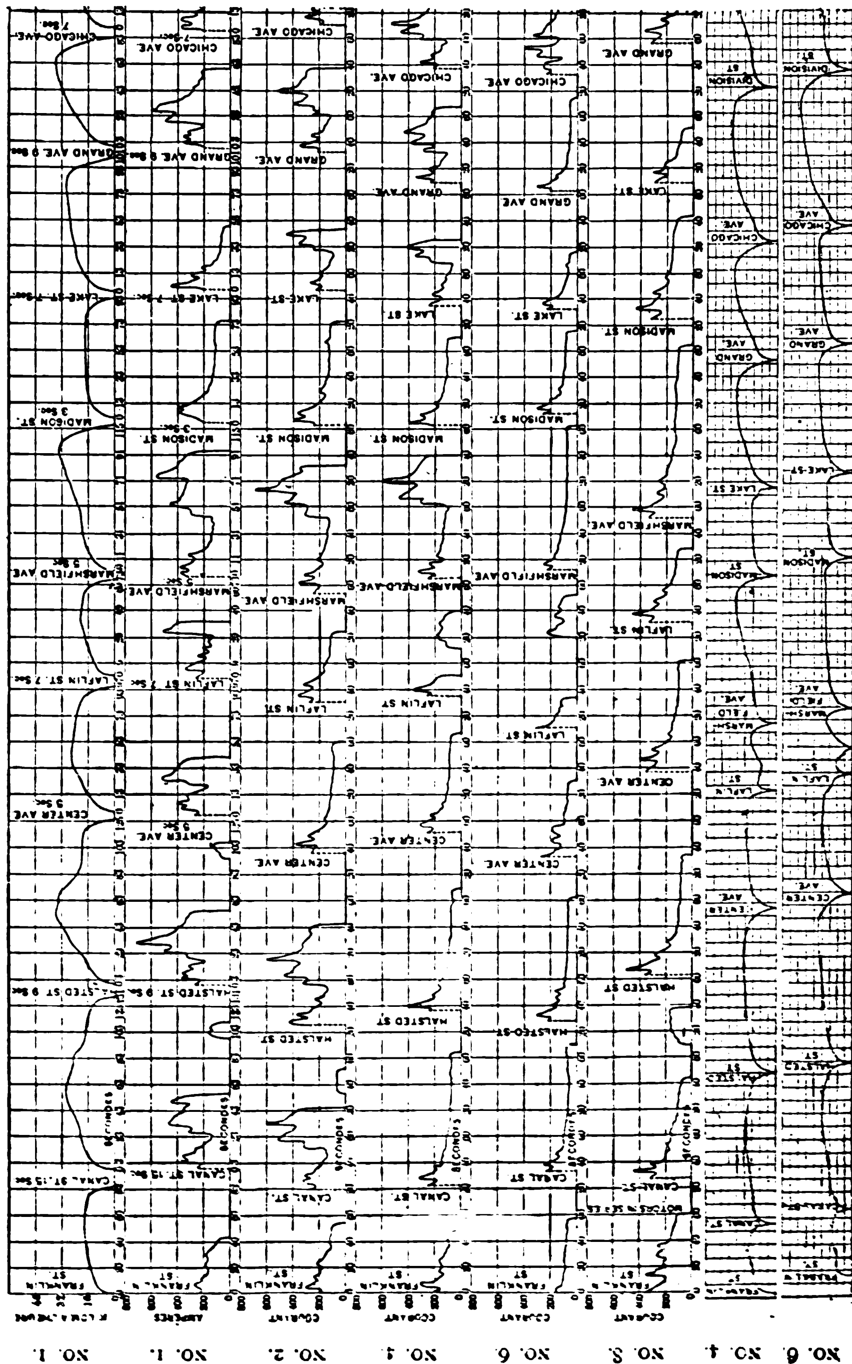


Fig. 851. — Graphiques de vitesse et de courant relevés sur le Metropolitan Elevated R.R. de Chicago.

ces courbes, qui caractérisent bien ce genre d'exploitation, mettent en évidence la remarquable régularité des variations de courant le long d'un parcours, ainsi que le rôle prépondérant de l'accélération et du freinage. Les 3 premiers voyages ont été effectués par des trains de 4 voitures lourdement chargées; les suivants par des trains de 3, puis de 2 voitures; enfin le dernier correspond encore à 4 voitures.

Les automobiles pèsent à vide 24 t. et les voitures d'attelage 21 t. La charge de voyageurs est en moyenne de 3 t. par voiture et au maximum de 5 t. Les automobiles sont équipées avec 2 moteurs de 125 chevaux, mais M. Baker se propose d'employer désormais 4 moteurs de 150 chevaux pour réaliser des accélérations plus rapides.

Le rendement diminue avec le poids des trains; la forte dépense d'énergie relevée durant le parcours n° 6 provient de la vitesse plus élevée réalisée et des pertes de travail qui en résultent lors du freinage. Pour le motif inverse, le parcours n° 8, effectué à faible vitesse (moteurs constamment en série), correspond à la plus faible dépense d'énergie. Sur la figure, les courbes de vitesse sont données seulement pour les parcours n°s 1, 4 et 6.

L'énergie mise en jeu dans chacun des parcours du tableau ci-dessus peut se décomposer comme il suit, par exemple dans le premier essai :

Énergie totale dépensée pour l'accélération du train . . .	63,9	p. 100
— — — la traction — . . .	29,1	—
— — — la montée — . . .	7	—
— — — l'ensemble	100	—

En admettant un rendement de 0,93 pour les génératrices, le rendement global de la transmission électrique est seulement de 0,47. Cette valeur relativement basse provient à la fois des causes indiquées plus haut et de la distance assez grande à laquelle se fait la transmission, qui entraîne une perte dans les conducteurs atteignant souvent 0,20 à 0,25.

Au lieu d'une seule automobile par train, on peut en employer un nombre plus grand, soit pour accroître l'effort de traction, soit pour rendre les trains symétriques et éviter ainsi les manœuvres aux stations terminus. Dans ce dernier cas, le système le plus simple consiste à encadrer les voitures d'attelage entre deux automobiles, qu'on peut commander à la fois de l'une quelconque des extrémités du train à l'aide de conducteurs réunissant tous les moteurs aux deux régulateurs extrêmes ou encore au moyen de servo-moteurs accouplés à chacun des régulateurs et permettant de les commander simultanément à distance (voir p. 260). La seconde disposition va être appliquée sur la ligne du Wannseebahn, dans la banlieue de Berlin; les automobiles sont à deux essieux munis chacun d'un moteur gearless; aussitôt après le démarrage, on met hors circuit l'automobile de queue pour améliorer le rendement.

A titre d'exemple du premier de ces deux systèmes, nous rappellerons les résultats obtenus sur le chemin de fer aérien de Liverpool.

La formation de train primitive comprend 2 voitures à bogies du type représenté par la figure 331 (t. I, p. 375). Un seul des bogies est moteur, et les

2 moteurs de chaque train sont réglés en série-parallèle. L'effort de traction total, sous 120 ampères par moteur, est de 1 620 kg.

Pour satisfaire à l'accroissement de trafic provenant d'une récente prolongation de la ligne[1], on a adopté dernièrement l'emploi de trains de 3 voitures, dont 2 seulement motrices et équipées avec des moteurs plus puissants ; ces derniers, dont nous avons déjà donné les courbes (t. I, p. 232), développent chacun 950 kg. environ à la jante avec 120 amp. Pour utiliser les anciennes voitures dans les mêmes conditions, on les a munies de paliers à rouleaux (voir p. 434).

La figure 852 représente les conditions de marche d'un train d'essai de 2 voitures (les puissances électriques portées en ordonnées sont sensiblement proportionnelles aux courants consommés) et le tableau ci-contre (p. 583) résume des expériences de M. Thos. Parker [2] sur ce matériel.

En service courant, le courant maximum débité par l'usine génératrice est de 860 amp. avec 7 trains en service, soit 123 amp. par train ou le double du courant moyen absorbé par chaque train, et 100 amp. par train avec 12 trains en service, ou seulement 50 p. 100 en plus du courant moyen. En déduisant l'énergie absorbée par le chargement des batteries d'éclairage ou actionnant les signaux et par les lampes et moteurs de la remise à voitures, la consommation moyenne, avec 12 trains en service, est de 37,5 chev. par train.

Les locomotrices de l'État belge (t. II, p. 105 et 256), munies de 2 moteurs gearless (1 par bogie) de 300 kgm. de couple, pourraient également consti-

[1] Avant cet accroissement, l'utilisation du matériel atteignait déjà 60 p. 100 des places offertes, alors que sur le Stadtbahn de Berlin, par exemple, elle n'est que de 30 p. 100 au plus.

[2] *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 27 février 1894. — Il nous paraît intéressant d'y joindre, d'après M. Cottrell (*The Electrician*, 9 octobre 1896), la décomposition du coût de la traction :

DÉCOMPOSITION DU COUT DE TRACTION PAR TRAIN-KILOMÈTRE

PREMIER SEMESTRE DE 1896		KILOGRAMMES par train-km.	KILOGRAMMES par kw.-h.	CENTIMES par train-km.	FRANCS par kw.-h.	OBSERVATIONS
Nombre de kilomètres parcourus	503,63	»	»	»	»	* La production d'énergie de 1 343 129 kw.-h. correspond à 2,66 kw.-h. par train-km. Un train complètement chargé pèse 38,5 t. ; mais, en moyenne, il n'y a eu que 60 p. 100 des places occupées, ce qui correspond à un poids total de train de 36 t. environ. Il a, par suite, été produit 0,129 kw.-h. par tonne-km. (non compris l'énergie absorbée par les batteries actionnant les signaux, etc.).
Nombre de kilowatts-heures produits (non compris le chargement des batteries) .	1 343 129 *	»	»	»	»	
Usine génératrice	Charbon.	5,14	1,930	3,211	0,012	
	Cendres			0,104	0,0003	
	Matières diverses.			1,072	0,004	
	Main-d'œuvre . .			4,990	0,018	
Entretien et réparations	Matières.			2,779	0,010	
	Main-d'œuvre . .			2,099	0,008	
Conduite des trains	Main-d'œuvre . .			7,979	0,030	
				22,234	0,0823	

tuer un matériel gearless pour métropolitain. Chacune pèse 28 t., dont 8 pour les moteurs, et peut remorquer une voiture semblable à des vitesses de

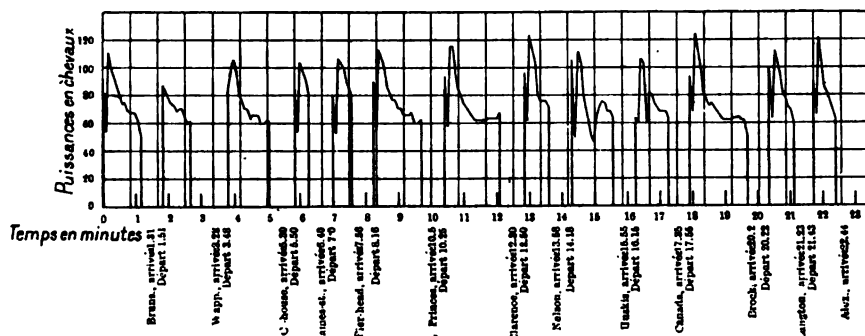


Fig. 852. — Variations de la puissance électrique consommée pendant le parcours d'un train sur le chemin de fer aérien de Liverpool.

30-40 km : h. ; la capacité totale du groupe est de 150 à 160 places ; on pourrait former des trains d'un ou deux groupes semblables.

ESSAIS FAITS SUR LE LIVERPOOL OVERHEAD RAILWAY (5 mars 1893)

	D'HERCULANUM A ALEXANDRA (retour). (Un seul train sur la ligne.)	
	1er essai.	2e essai.
Charge du train (lest de fonte) en tonnes	8,1	8,1
Poids total du train de 2 voitures (de 15,7 t. à vide) en tonnes	39,6	39,6
Durée totale du parcours	24^m57^s	23^m47^s
— du passage du courant dans les moteurs	17^m7^s	15^m18^s
Durée totale des arrêts	4^m35^s	4^m40^s
Distance totale parcourue en mètres	8 253,78	8 253,78
Vitesse moyenne, arrêts non compris, en km : h	24	25,9
Vitesse moyenne, arrêts compris, en km : h.	19,8	21,9
Courant moyen absorbé par le train en marche en ampères	82,7	90,8
Courant moyen absorbé par le train en marche, arrêts compris, en ampères	67,3	73
Puissance absorbée par le train en marche en chevaux	55,1	57,8
Puissance absorbée par le train en marche, arrêts compris, en chevaux	45 (33 300 w.)	46,6 (34 500 w.)
Voltage moyen aux bornes des moteurs en volts	485,2	484

Emploi de trains composés entièrement d'automobiles. — Une autre solution, préconisée depuis longtemps déjà par M. *F. J. Sprague*, dont nous avons mentionné les essais sur le Manhattan Elevated R. R. de New York (t. I, p. 34), et qui a été récemment adoptée par le South Side Elevated de Chicago et le Brooklyn Elevated, consiste dans l'emploi exclusif de voitures automobiles toutes semblables et équipées avec des moteurs calculés en vue de leur propulsion et de leur accélération individuelles. Ces voitures peuvent ainsi être groupées en nombre quelconque sans que le train cesse de présenter sensiblement les mêmes conditions de fonctionnement. Plus leur nombre est grand, il est vrai, plus le coefficient moyen de traction s'abaisse, les voitures d'arrière étant protégées contre l'effet de l'air par les précédentes ; mais, l'effort d'accélération étant prédominant, la différence est absolument insensible, comme on l'a vérifié par expérience.

Le réglage simultané des moteurs de toutes les voitures par un seul agent peut être réalisé à l'aide d'un des systèmes de servo-moteurs décrits au chapitre X (p. 260), tels que ceux de Sprague, Auvert, etc., qui permettent d'autre part d'accoupler et de découpler les voitures en nombre quelconque avec la plus grande facilité.

Comme exemple d'application de cette méthode, nous citerons les trains du South Side Elevated R. R., qui sont formés de 6 voitures pesant chacune 24 t. dont 14 portant sur les 2 essieux du bogie moteur, ce qui fait au total 144 t., dont 84 t. ou 58 p. 100 de poids adhérent; cette proportion est cinq fois plus forte que sur les trains actuels du Manhattan Elevated R. R. Les 2 moteurs de chaque voiture, du type G. E. 57, fournissant chacun 50 chev. de puissance moyenne et temporairement 100 chev., sont réunis sur le même truck comme sur les autres métropolitains américains et munis d'engrenages qui leur permettent de réaliser une accélération d'environ 1,6 km : h. à la seconde jusqu'à 32 ou 40 km.: h.; la vitesse maxima est de 60 km : h. à la tension de 540 volts, et le courant consommé correspondant de 29 à 30 amp. par voiture[1]. La vitesse commerciale est de 24 à 29 km : h., avec des stations espacées de 700 m. et des arrêts ne dépassant pas 10 secondes.

Ce système de trains formés exclusivement d'automobiles est, à certains égards, très séduisant : il permet d'utiliser l'adhérence mieux que le précédent et de réaliser par suite, à poids mort égal, des accélérations supérieures : un seul essieu moteur sur deux suffit, du reste, à obtenir pour chaque voiture les accélérations maxima définies précédemment. D'autre part, la flexibilité du service est beaucoup plus grande : on peut à volonté, soit porter au maximum la fréquence des trains en ne les formant que d'une ou deux voitures et les faisant partir à des intervalles variés suivant les différentes heures de la journée, soit, au contraire, maintenir un horaire fixe et faire varier le nombre des voitures accouplées ; les embranchements sont facilement desservis, grâce à la possibilité de morceler un train en d'autres plus courts ou inversement. Les manœuvres dans les gares et les remises sont également très simplifiées. Enfin, en cas de mise hors circuit d'une des automobiles, les autres suffisent à assurer la marche du train.

[1] Les moteurs sont essayés pendant 1 heure à 95 amp., puis à la suite pendant 10 minutes à 200 amp.

Mais ces avantages sont chèrement achetés : non seulement le prix du matériel roulant se trouve beaucoup augmenté, ainsi que les chances d'avaries, par l'accroissement du nombre des voitures équipées ; mais encore les frais d'entretien sont considérablement accrus par ce même fait. Le rendement est d'ailleurs moins bon, parce que plusieurs petits moteurs consomment toujours plus qu'un gros et que les frottements des engrenages à la descente des pentes prennent une importance plus grande.

Tout compte fait, il ne paraît pas que les inconvénients pratiques que nous venons d'indiquer et les complications du système soient assez largement compensés par ses avantages pour que cette solution puisse trouver une faveur générale auprès des compagnies de traction urbaine. Elle n'est vraiment rationnelle que sur les lignes à fortes rampes, telles que celle du Fayet(p. 23), où l'on pourrait craindre un manque d'adhérence avec les procédés ordinaires.

Emploi de locomotives séparées. — Les locomotives séparées ont l'avantage de permettre l'emploi de moteurs plus encombrants que ceux des automobiles.

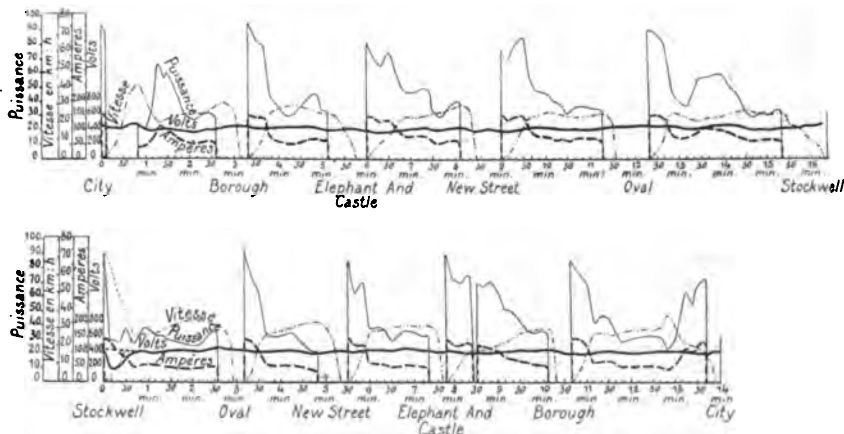


Fig. 853. — Graphiques des vitesse, courant, puissance et voltage en fonction du temps relevés sur le City and South London Railway dans un parcours aller et retour.

Leur poids est déterminé par l'effort d'accélération qu'on désire réaliser : il doit être, pour l'adhérence, au moins égal à 4 à 5 fois cet effort [1]; il convient de ne pas dépasser ce dernier chiffre si l'on ne veut pas avoir un poids mort inutile, comme nous l'avons dit plus haut (t. I, p. 492).

Au sujet de ce mode d'exploitation, il y a lieu de rappeler que le premier en date des métropolitains électriques, le City and South London Railway, a été équipé avec des locomotives séparées (que nous avons décrites au t. I, p. 417) ; mais ces machines, à deux moteurs gearless non suspendus, sont loin d'être à

[1] Ces chiffres de 4 et 5 peuvent sembler faibles à côté de ceux qu'on admet sur les chemins de fer ; mais il ne faut pas perdre de vue que les moteurs à mouvement de rotation constant utilisent mieux l'adhérence que les moteurs à couple variable, tels que ceux des locomotives à vapeur.

la hauteur des types plus modernes et leur réglage par rhéostat accroit encore cette infériorité au point de vue de la consommation d'énergie.

Le tableau ci-dessous indique les principales conditions d'un parcours sur cette ligne, longue de 5,075 km., sur laquelle les déclivités atteignent 6,6 p. 100 et les rayons de courbes descendent à 42 m. ; la figure 853 indique, d'autre part, les variations de vitesse, de courant et de puissance le long de ce parcours ; elle met bien en évidence les dépenses exagérées de courant auxquelles donnent lieu les démarrages, malgré les plans inclinés dont nous avons parlé plus haut (p. 574).

RÉSULTATS D'ESSAIS FAITS SUR LE CITY AND SOUTH LONDON RAILWAY [1]

PARCOURS	DURÉE TOTALE	DÉPENSE D'ÉNERGIE en watts-heures.	VOLTAGE MOYEN en volts.	COURANT MOYEN en ampères.	VITESSE MOYENNE en km : h.
Stockwell-City . .	14m36s	86,664	424,16	50,33	13,25
City-Stockwell . .	14m55s	87,208	424,71	49,52	12.97

Les expériences ont fait ressortir des rendements *moyens* de 0,90 pour la ligne, 0,78 pour les machines et dynamos, 0,70 pour les moteurs et 0,50 pour l'ensemble.

Le même mode de traction va être appliqué aussi par suite des nécessités d'un gabarit très réduit sur la nouvelle ligne tubulaire de Londres, le Central London Railway, mais avec un matériel beaucoup plus puissant et perfectionné construit par la General Electric Co. et sur lequel nous donnons quelques détails en annexe (t. I, p. 665).

Chaque locomotive aura 4 moteurs et pèsera en tout 35,5 t. ; les trains, formés de 7 voitures de 15 t., offrant au total 136 places et pesant 105 t., seront remorqués à la vitesse moyenne de 23,3 km : h.

On voit qu'il s'agit cette fois d'un service réellement comparable à celui des métropolitains à vapeur, tandis que les trains du City and South London Railway sont simplement équivalents aux trains légers à 2 voitures de Liverpool.

Comparaison entre le système des locomotives et celui des locomotrices. — Dans ce qui précède, nous avons vu employer concurremment les deux systèmes de traction par locomotives électriques et par automobiles ou locomotrices. Il est utile de rappeler les raisons qui doivent faire préférer le second toutes les fois qu'il est compatible avec les exigences de l'exploitation.

Au point de vue de la traction, les locomotives électriques ne réalisent pas

[1] D'après M. Alexander Siemens, *British Association*, août 1892.

les mêmes avantages que les automobiles, par suite de leur poids mort plus considérable, qui réduit à la fois le rendement, les rampes abordables et l'accélération réalisable (p. 494).

Le second système permet d'avoir des trains plus légers, plus faciles à mettre en marche et à arrêter, et par conséquent de réaliser des vitesses commerciales plus élevées avec la même dépense de puissance ou de plus longs parcours avec la même dépense d'énergie.

Les chiffres du tableau de la page 572 permettent de s'en rendre compte d'une manière bien nette. On voit, par exemple, que les trains du South Side Elevated ou du Metropolitan Elevated sont beaucoup plus avantageux que ceux du Central London Railway.

La comparaison la plus frappante est fournie par l'examen des deux trains types de Liverpool et de South London, qui datent à peu près de la même époque, sont équipés avec des moteurs analogues et présentent des poids et des conditions de parcours sensiblement équivalents. On voit que les trains de Liverpool, bien qu'ils soient de 12 p. 100 plus lourds et aient une capacité de plus de 18 p. 100 supérieure, marchent à une vitesse moyenne de 24 p. 100 plus élevée, tout en ayant 50 p. 100 plus d'arrêts sur un même parcours et en donnant lieu à des résultats économiques plus favorables, comme le montrent les résultats d'exploitation de 1895, résumés dans le tableau de la page 588.

L'avantage pour les métropolitains reste bien clairement aux voitures automobiles par rapport aux locomotives.

Cet avantage serait plus marqué encore sur des lignes de montagne. Si l'on prend, par exemple, la ligne de Mürren, exploitée au moyen de locomotives de 7,2 t. qui remorquent chacune une voiture pesant 4,5 t. à vide et pouvant recevoir 40 voyageurs, on voit que le poids mort du train par place offerte est de 292 kg., alors que sur des lignes suisses similaires où le service se fait par voitures automobiles le poids mort par place descend à 150 kg.[1], le poids adhérent restant néanmoins plus élevé que dans le premier cas.

A ces considérations il faut ajouter qu'avec des voitures automobiles on peut, à adhérence égale, diminuer la charge individuelle sur les roues motrices et, par suite, la fatigue de la voie ; on peut aussi supprimer, comme nous l'avons vu plus haut, par l'emploi de deux automobiles, les manœuvres d'aiguillage aux stations extrêmes de la ligne, et gagner ainsi du temps et de la place, puisqu'on n'a plus besoin en ces points de voies de transbordement.

Comparaison entre les deux types de moteurs à engrenages et gearless. — C'est dans l'exploitation des métropolitains plus que partout ailleurs qu'on peut hésiter entre les moteurs à engrenages et sans engrenages, et il y a intérêt à reprendre ici, à ce point de vue spécial, la comparaison que nous avons déjà faite sous une forme plus générale (t. I, p. 138).

Les moteurs à engrenages sont ordinairement plus légers, moins encombrants et moins coûteux d'achat que les moteurs gearless ; leur démontage

[1] Par exemple, sur la ligne Stanstadt-Stans, où l'exploitation se fait au moyen de voitures automobiles à deux moteurs, pesant 5,7 t. à vide et contenant 30 places, chaque voiture motrice remorque une voiture de même capacité pesant 3,2 t. à vide. Le poids adhérent en charge est de 3 825 kg. dans le premier cas et de 3 600 kg. dans le second.

COMPARAISON ENTRE LE LIVERPOOL OVERHEAD RAILWAY ET LE CITY AND SOUTH LONDON RAILWAY

	LIVERPOOL OVERHEAD RAILWAY				CITY AND SOUTH LONDON RAILWAY			
	Décembre 1894.	Juin 1895.	Décembre 1895.	Juin 1896.	Décembre 1894.	Juin 1895.	Décembre 1895.	Juin 1896.
Valeur par voyageur en centimes	0,175	0,202	0,207	0,206	0,174	0,182	0,180	0,181
Rapport des dépenses aux recettes p. 100 .	66,84	66,43	59,97	63,05	60,87	61,55	59,62	60,22
Rapport des dépenses de traction aux dépenses totales p. 100.	24,78	24,26	26,05	22,51	39,24	37,95	38,98	36,30
Rapport des dépenses de traction aux recettes brutes p. 100	16,56	16,12	15,62	14,19	23,88	23,36	23,24	21,86
Rapport des dépenses de mouvement aux dépenses totales p. 100	38,88	37,54	35,33	36,05	38,70	39,13	38,69	38,91
Rapport des dépenses de mouvement aux recettes brutes p. 100.	25,99	24,94	21,19	22,73	23,56	24,09	23,07	23,43
Dépenses par train-kilomètre en centimes	85,67	94,04	92,27	98,75	100,45	105,09	101,04	104.38
Recettes par train-kilomètre —	128,12	141,59	153,89	156,63	165,07	170,76	169,51	172,00
Dépenses de traction en centimes. . . .	21,25	22,82	24,06	22,24	39,44	39,89	39,37	37,60
Nombre de voyageurs transportés	3 641 379	3 460 060	3 780 375	3 739 575	3 275 649	3 113 199	3 172 438	3 192 672
Nombre de trains-kilomètres parcourus .	505 985	500 956	517 160	503 633	371 042	360 832	365 805	362 916
Nombre de stations	16	16	16	16	6	6	6	6
Proportion de trains à l'heure p. 100. . .	95	96,8	98,4	98,3	»	»	»	»

est beaucoup plus facile ; ils peuvent s'établir par séries ; leur coefficient de réduction peut être facilement modifié ; enfin leur rendement, engrenages compris, est tout à fait comparable, à vitesse normale, à celui des moteurs gearless. Ces derniers sont plus difficiles à visiter et à démonter ; de plus, ils ne peuvent guère être suspendus élastiquement que par le système compliqué de l'arbre creux (t. I, p 138), car on ne peut guère songer à les placer en dehors des essieux en leur faisant attaquer les roues par bielles, ainsi qu'on l'a proposé (voir t. I, p. 135) : ce serait s'exposer à des ruptures et perdre la simplicité et l'uniformité d'effort qui constituent les meilleurs arguments en faveur des moteurs électriques.

Il semble donc que pour les métropolitains il n'y ait pas à hésiter en faveur de l'adoption des moteurs à engrenages, en vertu des règles que nous avons exposées au chapitre IV (t. I, p. 138); c'est actuellement la pratique générale aux États-Unis, où cette solution semble aujourd'hui hors de discussion.

Mais, en Europe, on reproche aux moteurs à engrenages de faire plus de bruit, d'exiger plus d'entretien et d'offrir plus de chances d'arrêt intempestif que les moteurs gearless : il peut suffire, dit-on, du bris d'une dent d'engrenage pour immobiliser une voiture et arrêter l'exploitation. C'est le principal motif que font valoir les ingénieurs anglais pour proscrire les engrenages sur tous leurs métropolitains anciens et nouveaux. On entend souvent alléguer aussi que l'emploi des moteurs gearless permet à une automobile privée de courant, comme dans les trains du Wannseebahn, d'être remorquée sans offrir une résistance à la traction supérieure à celle des voitures ordinaires [1], tandis que les engrenages occasionnent dans les mêmes conditions une augmentation de résistance de plusieurs kilogrammes par tonne (2 à 4 kg.) (voir p. 453).

Ces objections ne sont cependant pas irréfutables. Le remorquage d'une automobile n'a aucune raison d'être sur un métropolitain, où l'on doit d'abord utiliser le plus grand effort accélérateur possible au démarrage, puis supprimer tout courant ; si l'on emploie dans un même train plusieurs automobiles, il est donc rationnel de les avoir toutes en même état de fonctionnement. Le bruit n'est pas un inconvénient capital, étant donné qu'il peut être fort réduit par l'emploi de boîtes à engrenages peu sonores et abondamment lubrifiées. Enfin, le bris des dents peut être évité pratiquement d'une manière complète en reliant la roue d'engrenages à l'essieu non par un assemblage rigide, mais par l'intermédiaire d'un accouplement élastique, comme on l'a vu, par exemple, pour certaines locomotives de mines de la General Electric Co. (t. I, p. 530).

D'un autre côté, au point de vue électrique, les moteurs gearless, bien qu'ayant en pleine marche un rendement au moins équivalent à celui des moteurs à engrenages, sont en général moins économiques pour la production de l'effort accélérateur au départ.

On voit que les arguments en faveur de l'un ou de l'autre des deux types de moteurs ne sont pas absolument décisifs; dans chaque cas particulier, il y a donc lieu de faire une comparaison en mettant en balance ces avantages et ces inconvénients, dont l'importance sera estimée suivant les espèces. Telles circonstances spéciales de l'exploitation peuvent faire pencher en faveur de l'un

[1] Le locomoteur d'essai de l'État belge a donné par exemple à 60 km : h. un coefficient de traction de 5 kg : t. seulement.

ou de l'autre : par exemple, si l'on ne dispose que d'un faible gabarit, le moteur à engrenages pourra permettre d'employer des automobiles là où le moteur gearless exigerait des locomotives ; au contraire, si l'on a besoin d'une forte adhérence, d'une vitesse très élevée et d'une marche très silencieuse, le moteur gearless peut devenir préférable, surtout si l'on admet pour d'autres motifs l'emploi de locomotives séparées.

III. — Chemins de fer

Comme nous l'avons expliqué au chapitre VII (t. I, p. 500), la traction électrique ne peut être recommandée actuellement sur les chemins de fer que dans des cas spéciaux, notamment sur les lignes suburbaines à trafic intense et sur les lignes d'intérêt local ou de touristes, spécialement en pays de montagne [1].
Nous allons examiner sommairement ces deux cas.

Services suburbains. — La traction sur les lignes suburbaines se fait, suivant les espèces, soit par des trains légers et fréquents, analogues à nos trains-tramways, soit au contraire par des trains lourds, tels que ceux de la banlieue parisienne ou londonienne. C'est ce dernier mode d'exploitation qui est le plus fréquent aux environs des grandes villes.

Par exemple, en Amérique, les trains suburbains du Chicago, Rock Island and Pacific R. R., aux abords de Chicago, comportent en moyenne 7 voitures (au maximum 12) de 26,5 t. en charge, remorquées par une machine pesant avec son tender 88 t., dont 48,5 sur les essieux moteurs. Le poids total est de 274 t., l'effort de traction maximum de 6 800 kg., soit 24,7 kg. par tonne, et la vitesse entre stations de 45 à 50 km : h.

En Europe, les trains suburbains pèsent le plus généralement de 150 à 250 t. Par exemple, sur la ligne de Paris-Versailles, l'exploitation est faite par des trains de 145 à 280 et même 285 t. ; les trains à voyageurs remorqués par les locomotives 350 comprennent en hiver 15 véhicules et pèsent 145 t. ; en été, ils se composent de 17 voitures et pèsent 165 t. A certaines heures, les dimanches et fêtes, l'intervalle entre les trains n'est que de 5 minutes.

La Compagnie d'Orléans aura à assurer pour 1900 par la traction électrique un service de trains lourds encore plus chargé entre la gare de la place Valhubert et celle du quai d'Orsay.

Lorsque les trains sont aussi rapprochés que dans ces derniers cas, on ne peut songer à accroître le trafic que par une augmentation du poids des trains, et la traction électrique ne peut guère se faire que par locomotives puissantes, ce qui en rend les avantages assez problématiques ; on peut la considérer cependant comme imposée par les conditions d'exploitation dans le cas de lignes en souterrain.

Au contraire, sur les lignes où les trains sont peu nombreux et où, par conséquent, leur dédoublement est possible, la traction électrique commande cette modification, si l'on veut en tirer le meilleur parti : les trains lourds

[1] Nous ne répéterons pas ce que nous avons dit plus haut (chap. VIII et XIII) sur la réalisation possible de très grandes vitesses le jour où on aura les moyens d'utiliser celles-ci au point de vue économique.

exigeraient l'emploi, soit de locomotives électriques dont on connait les inconvénients, soit de plusieurs voitures locomotrices; il est rationnel de les subdiviser en trains plus légers, n'ayant chacun qu'une ou deux au plus de ces voitures motrices. On peut le faire sans augmenter les dépenses actuelles de personnel, puisqu'un seul agent suffit pour la manœuvre du régulateur de vitesse, lorsque le conducteur a un accès facile auprès de lui. On y trouve d'autre part plusieurs avantages : d'abord celui d'augmenter la souplesse de l'exploitation et de faire ainsi une concurrence victorieuse aux services de tramways et d'omnibus voisins de la ligne, en offrant aux voyageurs des départs aussi fréquents en même temps qu'une vitesse plus grande ; ensuite celui d'uniformiser davantage la charge de l'usine génératrice, condition essentielle pour une marche économique.

La composition des trains suburbains électriques doit donc être analogue à celle des trains métropolitains décrits ci-dessus. Les arrêts seront, il est vrai, moins rapprochés et les trains moins nombreux ; on pourrait donc employer des moteurs à accélération moins rapide (0,50 à 1 km : h : s.) et remorquer avec une même puissance des trains plus lourds; mais il va sans dire qu'abondance de biens ne nuit pas et qu'il n'y a aucun inconvénient à conserver de fortes accélérations si l'on peut faire la dépense de moteurs puissants.

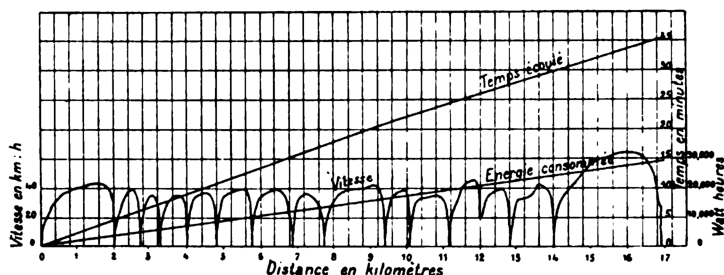
L'expérience des lignes électriques de la New York, New Haven and Hartford R. R. Co. (qui cependant ne sont pas tout à fait des lignes de banlieue) démontre surabondamment que ce mode d'exploitation est pratique et économiquement possible dans certaines conditions [1]. Cette Compagnie a acquis sur ce sujet une opinion parfaitement raisonnée à la suite d'essais prolongés effectués sur sa ligne expérimentale de Nantasket Beach, longue de 11,2 km. entre Nantasket Junction et Pemberton, qui a été équipée électriquement en juillet 1895; les dispositions qu'elle a adoptées en dernier lieu pour la ligne d'Hartford à Berlin peuvent donc être considérées comme un bon modèle.

Cette dernière ligne comprend deux tronçons, l'un de 12,2 km. entre Hartford et New Britain, parcouru antérieurement par 8 trains par jour dans chaque sens, l'autre de 4,8 km. entre New Britain et Berlin, antérieurement desservi par 14 trains dans chaque sens. Le nouvel horaire a substitué à ce service des trains électriques de 2 voitures se suivant à une demi-heure d'intervalle entre Hartford et New Britain, de 6 heures du matin à minuit, et 16 trains par jour dans chaque sens entre New Britain et Berlin. Ces trains comprennent chacun une voiture locomotrice (voir t. I, p. 458) munie de deux moteurs G. E. 2000 de 125 chev. et une voiture remorquée; la régulation est faite par la méthode série-parallèle.

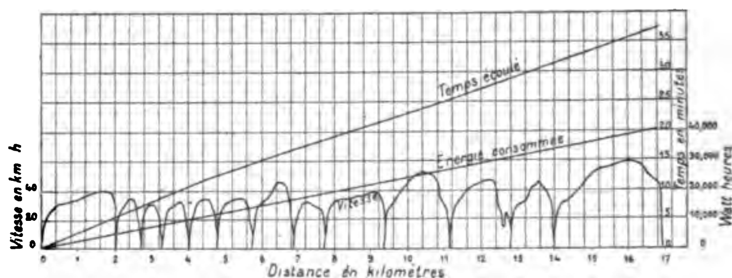
Les figures 854 et 855 représentent, d'après M. Heft, les résultats obtenus sur la ligne de Nantasket Beach à l'aide de ces locomotrices avec et sans voiture

[1] Le succès économique obtenu dans le cas considéré tient à des conditions particulièrement favorables. Ces lignes traversent des pays à population dense, où les villas et habitations d'été sont extrêmement nombreuses, et on utilise comme combustible à l'usine des déchets de boîtes à fumée des locomotives. M. Heft, directeur du service électrique de ladite C[ie], à qui nous devons ces renseignements, insiste sur cette considération de manière à prémunir contre des erreurs d'appréciation et des désillusions possibles les compagnies qui prendraient modèle sur ces installations.

remorquée. Les engrenages étaient à faible réduction de vitesse (1 : 3,18), et le poids de la locomotrice s'élevait à 32 t.



Automobile et voiture d'attelage.



Automobile seule.

Fig. 854 et 855. — Graphiques de vitesse et de consommation relevés sur la ligne électrique de Nantasket Beach.

Le tableau suivant résume les résultats de ces deux essais et donne toutes les conditions du fonctionnement des trains employés.

N° DE L'ESSAI	I (FIG. 854)	II (FIG. 855)
Nombre de voitures	1	2
Poids du train en tonnes	32	60
— de la charge —	2	4
— total —	34	64
Nombre total des arrêts	14	13
Distance moyenne entre les stations en mètres	1 200	1 300
Vitesse moyenne en km : h	28,5	27,3
Durée du parcours	35m 40s	37m 15s
Energie consommée par train-km. en kw.-h.	1,73	2,38
— par tonne-km. en w.-h.	50,8	37,3

On voit que l'effet de la charge plus grande dans le second essai augmente beaucoup le rendement, ce qui montre que les moteurs sont trop puissants pour la voiture locomotrice seule. Le train normal est donc bien celui de

2 voitures. En comparant ces essais à ceux des trains de Chicago (p. 579), on voit que les dépenses d'énergie sont beaucoup moindres ; cela provient du plus petit nombre des arrêts.

Le démarrage de ce train se fait en 50 secondes environ, et la vitesse suit une loi sensiblement parabolique pendant la période d'accélération ; au bout de 50 secondes, elle atteint 36,2 km : h. ; la distance parcourue est de 343 m. et l'énergie consommée atteint 1 900 w.-h., soit environ 30 w.-h. par tonne.

Nous avons donné plus haut (p. 410) un graphique d'essais obtenu avec une seule voiture locomotrice à plus grande vitesse (réduction des engrenages 1 : 1,45), parcourant la même ligne sans arrêt ; on y trouvera aussi le profil en long et l'indication des courbes.

Sur des lignes plus chargées et à arrêts fréquents, on pourra employer des trains plus lourds formés de 4 ou 5 grandes voitures à bogies analogues à celles des métropolitains américains (ou de 8 à 10 voitures ordinaires), dont une munie de 4 moteurs de 125 ch. capables de développer par exemple jusqu'à 4 000 kg. d'effort à la jante au démarrage, avec une accélération de 0,60 à 1 km : h : s., et de réaliser une vitesse normale de 35 à 40 km : h.

LIGNE DESSERVIE	Longueur en mètres.	NOMBRE de trains en semaine.			NOMBRE de trains le dimanche.			TONNAGE des trains.		Arrêts dans les gares intermédiaires	Battements aux gares terminus au minimum.
		Durée du service par jour.	Nombre maximum des trains à l'heure dans chaque sens.	Nombre total des trains.	Durée du service par jour.	Nombre maximum des trains à l'heure dans chaque sens.	Nombre total des trains.	Semaine.	Dimanche.		
		h.			h.			t.	t.	min.	min.
Saint-Lazare à Auteuil . . .	8 200	20	6	100	20	8	120	125	200	1	8
Saint-Lazare aux Invalides par Boulainvilliers . .	10 600	20	6	90	20	8	100	125	150	1	8
Invalides à Grenelle-Ceinture.	5 050	20	4	56	20	4	64	125	150	1	8
Exposition. Invalides-Champ-de-Mars. Navette. — Petit service.		13	10		10	10		75 et 150	75 et 150	45 s.	8
	2 100			190			220				
Exposition. Invalides-Champ-de-Mars. Navette. — Grand service.		3	20		6	20		150	250		8

Un des exemples les plus intéressants d'application de la traction électrique aux lignes suburbaines va peut-être être réalisé sur l'Illinois Central R. R., aux abords de Chicago. On équiperait d'abord 2 des 6 voies de la ligne de Randolph Street à Jackson Park, longue de 12 km., qui suit le lac Michigan ; les voitures auraient une capacité de 100 voyageurs chacune et les trains, formés de 4 véhicules et se suivant à intervalle de 2 minutes à la vitesse de 32 km : h., pourraient transporter 12 000 voyageurs par heure entre 6 heures du matin et 3 heures de l'après-midi, avec un maximum de 24 000 voyageurs entre 3 et 5 heures.

Ce service remplacera celui qui est actuellement réalisé par 101 trains à vapeur, de 3 à 7 voitures chacun, dont nous avons donné plus haut (p. 556) un graphique de marche type[1] Le but de la transformation est principalement d'augmenter le nombre des trains pour lutter contre la concurrence des tramways. Grâce aux 4 voies restantes, les trains lourds pourront continuer à employer la traction à vapeur sur la même ligne.

En France, les Compagnies de l'Ouest et d'Orléans ont en projet des services analogues sur plusieurs lignes, notamment celles d'Auteuil-Invalides-Champ-de-Mars et celle de Sceaux, ainsi qu'un service spécial pour l'Exposition de 1900. Le tableau de la page 593 indique, par exemple, les conditions d'exploitation prévues par la Compagnie de l'Ouest pour ses diverses lignes en question.

Services interurbains et services d'intérêt local. — Aux États-Unis, où il existe de nombreuses villes de premier ordre, chacune d'elles joue dans un

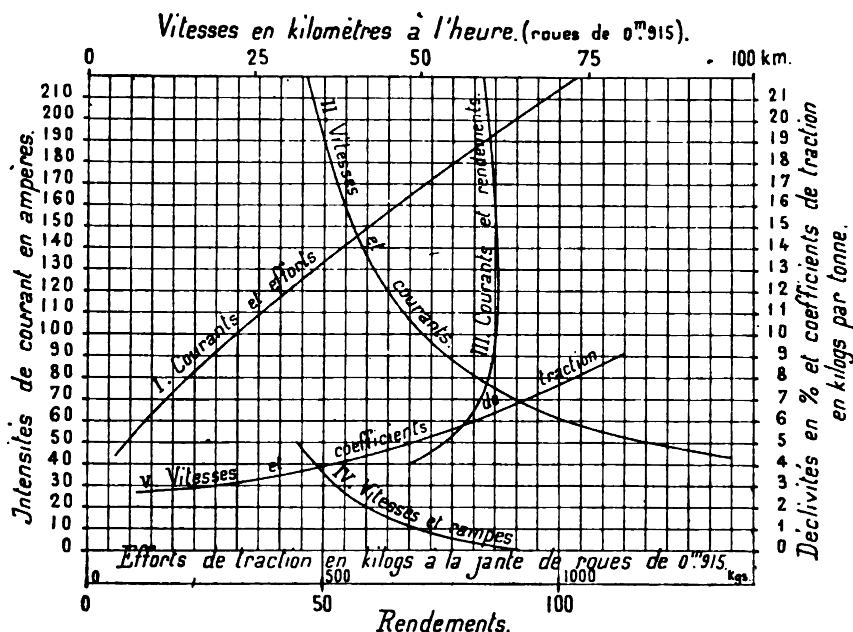


Fig. 856. — Courbes de fonctionnement d'un train léger de 46 t. muni de 2 moteurs de 100 chev. (matériel Walker).

certain rayon le rôle d'une petite capitale. Les lignes de tramway suburbaines s'étendent peu à peu autour des plus importantes jusqu'à rejoindre les centres voisins, pour constituer ce qu'on appelle là-bas du terme spécial de « lignes

[1] Les locomotives à vapeur actuellement employées pour ce service développent un effort maximum de 6 300 kg. et une puissance maxima entre stations de 510 chev. ; il y a 14 trains à la fois sur la ligne.

interurbaines », qui n'a pas d'équivalent en Europe jusqu'à présent. Nous avons déjà dit ce qu'il faut penser de ce genre d'exploitation (voir t. I, p. 35 et 353), dont le réseau environnant Cleveland offre un exemple typique ; c'est ce qu'on appellerait plutôt en France des lignes d'intérêt local.

La traction électrique se fait sur ces lignes par trains plus légers et à arrêts bien plus espacés que dans le cas précédent, qui atteignent souvent aussi des vitesses plus élevées, mais n'ont besoin que d'accélérations plus faibles. Comme exemple de matériel répondant à ces desiderata, on peut citer d'abord les trains déjà mentionnés de Nantasket Beach et d'Hartford-Berlin ; nous signalerons en outre deux types de trains étudiés par la Compagnie

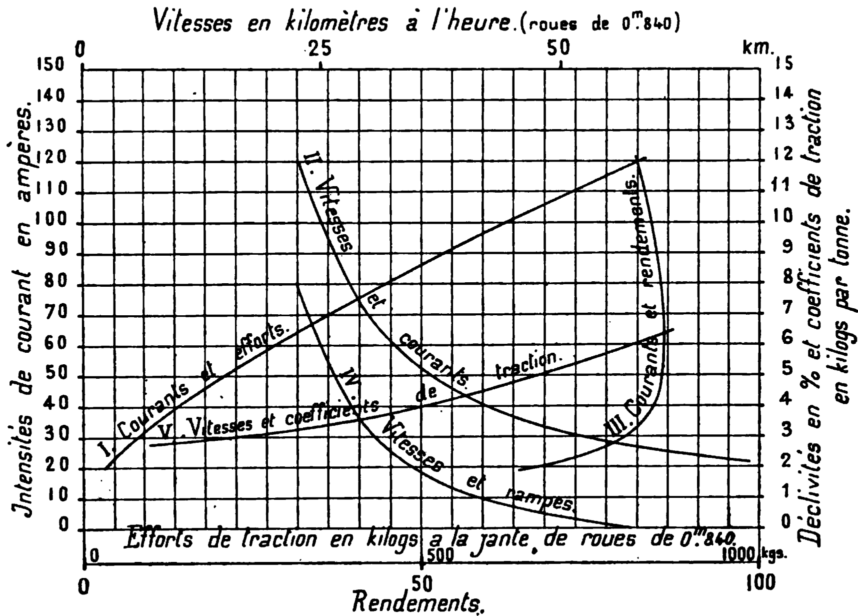


Fig. 857. — Courbes de fonctionnement d'un train léger de 22 t. muni de 2 moteurs de 50 chev. (matériel Walker).

Walker et dont le tableau de la page suivante et les courbes des figures 856 et 857 indiquent très complètement les conditions de fonctionnement.

L'un est le train de 46 t. représenté par la figure 320 (t. I, p. 362), qui se compose de 2 voitures pesant chacune 14 t. à vide et sans équipement électrique et dont l'une porte 2 moteurs de 100 chev. à engrenages; l'ensemble contient environ 150 personnes.

L'autre train est formé d'une seule automobile pesant 12 t. à vide et sans équipement, et 22 t. avec 2 moteurs de 50 chev. et une charge de 100 personnes, dont 50 assises.

Ces trains peuvent réaliser une vitesse commerciale de 40 km : h.

Ce ne sont autre chose que des *trains-tramways* caractérisés par leur légèreté et par une vitesse relativement élevée.

TRAIN DE 46 TONNES (2 voitures, 2 moteurs de 100 chevaux).						TRAIN DE 22 TONNES (1 seule automobile, 2 moteurs de 50 chevaux).					
Rampe maxima p. 100.	Vitesse en km : h.	Courant total en ampères.	Puissance en chevaux.	Rendement p. 100.	Effort de traction en kg.	Rampe maxima p. 100.	Vitesse en km : h.	Courant total en ampères.	Puissance en chevaux.	Rendement p. 100.	Effort de traction en kg.
0	65,205	136	76,86	83,3	317,10	0	57,12	54	28,40	77,7	133,18
0,5	56,0	169	98,56	85,7	476,56	0,5	47,46	67	37,52	82,3	208,38
1	49,4	205	120,67	86,7	657,75	1	41,19	83	47,66	84,7	303,51
1,5	45,08	240	141,35	86,9	842,58	1,5	37,1	97	56,28	85,6	401,36
2	41,8	273	161,23	87,0	1 032,84	2	34,4	110	64,29	86,0	493,77
2,5	39,3	307	179,48	86,4	1 227,63	2,5	32,2	123	71,59	86,0	588,90
3	37,3	341	197,73	85,8	1 434,20	3	30,5	134	78,28	86,0	679,50
3,5	35,7	374	217,00	85,3	1 630,80	3,5	29,3	146	85,17	85,8	774,63
4	34,1	408	234,23	84,6	1 845,52	4	28,1	158	91,87	85,6	876,55
4,5	32,8	438	249,44	83,8	2 043,03	4,5	27,2	169	96,05	85,2	973,95
5	31,5	470	263,64	82,3	2 265,00	5	26,4	180	103,63	84,7	1 069,08

En Europe, le service local à grande vitesse est encore peu développé, d'une part parce que les grands centres y sont moins nombreux, de l'autre parce que la vie y est moins fiévreuse qu'en Amérique et qu'on recherche moins par conséquent la rapidité des communications interurbaines. Il n'y aura probablement pas d'ici longtemps intérêt pour les Cies de chemins de fer à installer des trains de ce genre sur leurs lignes; il faudra qu'auparavant les tramways électriques aient pris un développement suffisant pour que les chemins de fer voisins aient à redouter leur concurrence. Les lignes d'intérêt local exploitées par l'électricité emploient bien déjà des trains légers, mais moins nombreux et moins rapides. On préfèrerait donc en Europe, pour utiliser les matériels que nous venons de décrire, réduire la vitesse (à 30 km : h. par exemple) au profit de l'effort de traction, ce qui permettrait d'augmenter le nombre des voitures remorquées. Les trains électriques d'intérêt local déjà mentionnés (t. I, p. 363 et suiv.) de Chavornay-Orbe, Pierrefitte-Cauterets, Meckenbeuren-Tettnang, etc., en donnent des exemples, avec automobiles servant de fourgons ou de voitures à voyageurs et remorquant d'autres voitures. Dans ces services, la vitesse n'a pas besoin d'être bien grande et il y a tout intérêt à la diminuer pour réduire la puissance de l'usine, qui n'alimente le plus souvent qu'un ou deux trains à la fois.

On peut même dans certains cas accepter la solution de trains-tramways ou d'automobiles isolées à accumulateurs. On en trouve un exemple sur certaines lignes de la Compagnie du Nord français, de l'État hongrois, des chemins de fer wurtembergeois, où cette disposition vient d'être adoptée pour remplacer des services à vapeur.

Les voitures automobiles à accumulateurs de la Compagnie du Nord sont de deux types : le premier, qui est en principe destiné au transport des dépêches postales et doit éviter à la Compagnie de mettre en circulation à des heures trop matinales ou trop tardives des trains dont les horaires, fixés pour les

besoins de l'administration des Postes, ne correspondent en aucune façon à ceux des voyageurs, comporte simplement un compartiment de 12 places et une cabine de mécanicien. Cette voiture, à 2 essieux, est actionnée par un moteur à induit fixe et inducteurs tournants calés directement sur l'essieu d'arrière; le collecteur, complètement séparé et disposé à l'intérieur de la cabine, est mis en mouvement par un petit moteur auxiliaire synchrone du moteur principal. La batterie, logée dans une caisse suspendue entre les essieux, sous les longerons, est composée de 40 éléments à 9 plaques de 400/400 de la Société pour le Travail électrique des Métaux. Le poids total de l'automobile en ordre de marche est de 14640 kg., dont 7065 pour le véhicule seul, 1825 pour le moteur, 950 pour le collecteur et les appareils de manœuvre, et 3800 pour les accumulateurs. L'effort à la jante des roues est en moyenne de 160 kg., correspondant à un courant de 200 ampères sous 80 volts, et peut s'élever jusqu'à 285 kg. au démarrage.

Le second type, étudié pour le transport des voyageurs, est à plusieurs compartiments contenant au total 50 places et est équipé comme le précédent; son poids total est de 18100 kg., dont 12000 pour le véhicule, 2600 pour le moteur et ses accessoires, et 5500 pour les batteries. Ce dernier type est destiné à assurer deux genres de services :

1° Le service des trains-tramways temporaires ou permanents dont l'importance ne justifie pas le déplacement d'une locomotive à vapeur ;

2° Les services restreints de trains légers soit sur des lignes secondaires, soit même sur des lignes principales. Il arrive, en effet, que des trains effectuent inutilement le trajet total entre deux gares de bifurcation, bien qu'étant à peu près vides sur une partie du parcours, et cela à cause des difficultés pour mettre la machine de tête en queue, la tourner, etc. L'automobile électrique permettra de s'arrêter à une gare quelconque du parcours et de revenir sans faire de manœuvres, grâce à la liaison des voies principales qui existe dans toutes les gares. Son emploi permettra, en outre, d'alléger d'un grand nombre d'arrêts certains trains actuellement très lents et dont la vitesse commerciale pourra être ainsi accrue, en y intercalant une automobile qui sera détachée à l'un des points d'arrêt obligatoires et continuera ensuite isolément en desservant les stations moins importantes. Ces voitures électriques présentent, en effet, l'avantage, que ne possèdent pas, par exemple, les automobiles à vapeur du système Serpollet, également essayées par la Compagnie du Nord, de pouvoir entrer comme véhicules ordinaires dans la composition d'un train.

Une automobile du même genre, équipée par la Société Kummer, est en essais sur les chemins de fer de l'État wurtembergeois. C'est une voiture à voyageurs ne comprenant que des places de 3e classe et montée sur bogies; la batterie d'accumulateurs, suspendue entre les bogies, alimente 2 moteurs de 35 chev. Le poids total de l'automobile est de 27 t. environ. Elle est capable de traîner un train de 51 t.; avec une seule voiture remorquée (poids total du train 40 t.), la vitesse atteint 35 km : h. en palier et 22 km : h. sur rampe de 0,02.

CHAPITRE XIV

PUISSANCE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUES CONSOMMÉES SUR LES VOITURES ET A LA STATION GÉNÉRATRICE PROJETS DE TRACTION

Les données numériques et méthodes exposées dans le chapitre précédent permettent de calculer avec le degré de précision désiré la marche des voitures sur les lignes électriques et la dépense d'énergie qu'elles nécessitent.

Comme cette détermination constitue en réalité la solution du problème de l'établissement d'un *projet de traction* pour l'exploitation électrique d'une ligne ou d'un réseau, il nous paraît commode de nous placer dès maintenant à ce point de vue et de suivre dans l'examen de la question la marche même qui convient à l'établissement d'un avant-projet de ce genre.

§ 1. — Marche des véhicules

Avant d'étudier les éléments de la puissance et de l'énergie dépensées sur une ligne, il convient de fixer par des considérations étrangères au mode de traction la marche des véhicules sur la ligne considérée.

Cette détermination ne présente, comme on va le voir, aucune difficulté dans le cas des tramways ou des chemins de fer d'intérêt local exploités d'une manière analogue. Sur les chemins de fer ordinaires la marche des trains dépend d'éléments plus complexes qui sortiraient de notre cadre et qu'on pourra étudier dans les

traités spéciaux où ils sont exposés avec détails[1]. Dans ce qui suit, nous nous occuperons donc plus spécialement du cas des tramways.

Horaire des départs. — L'établissement d'un projet de traction sur un réseau de lignes dont le tracé est donné a pour point de départ la fixation de l'horaire du service sur chacune d'elles et le choix de la capacité des voitures; ces deux éléments sont connexes, puisque le produit du nombre des voyages par le nombre des places offertes donne le nombre total des voyageurs qu'il est possible de transporter.

La question a été étudiée plus haut avec détails (t. I, p. 347) : d'une manière générale, le service le plus satisfaisant pour le public est celui qui donne la plus grande fréquence possible de départs des véhicules ou des trains ; mieux vaut donc, quand on le peut, employer des petites voitures de 30 places se suivant à court intervalle, de 5 à 7 minutes par exemple, que des grandes voitures de 50 places à départs espacés de 10 à 15 minutes.

On a vu également qu'au point de vue de la rapidité du transport les voitures à impériale sont toujours moins avantageuses que les autres. La seule considération qui puisse en justifier l'emploi dans le cas de lignes à forte circulation est celle du prix d'établissement; mais elle doit être secondaire lorsqu'il s'agit d'organiser un bon service de tramway.

Quel que soit le type de voitures, la double voie est indispensable dès que le nombre des départs dépasse 10 à l'heure environ.

Une fois qu'on connaît le nombre de départs par heure à réaliser aux divers moments de la journée, nombre qui doit être réglé proportionnellement à l'activité de la circulation prévue, on peut établir l'*horaire des départs*.

Dans le cas de la simple voie, cet horaire dépend forcément de la nécessité de répartir convenablement les points de croisement, ainsi que nous l'indiquons plus loin.

Vitesses. — Il y a lieu, comme on le sait, de distinguer dans la traction trois vitesses différentes :

[1] Voir notamment le Cours de M. Bricka, déjà cité.

La *vitesse maxima* de marche;

La *vitesse moyenne* entre arrêts;

Et la *vitesse commerciale*, c'est-à-dire la vitesse moyenne d'un parcours, calculée en divisant la longueur du trajet parcouru par la durée totale du voyage, arrêts compris.

Des règlements administratifs imposent habituellement dans chaque pays des limites à la vitesse de marche. En France, le décret du 6 août 1881 fixe pour toutes les voies ferrées empruntant le sol des voies publiques un maximum de 20 km : h.; il a toutefois été admis dans la pratique que cette vitesse pouvait être dépassée sur les parties de tramway établies en déviation sur une plate-forme spéciale ne pouvant servir à la circulation publique. Il serait à souhaiter, si l'on veut tirer le meilleur parti de la traction électrique, que cette tolérance fût étendue aux sections de tramway ou de chemin de fer sur route situées hors des agglomérations, sur lesquelles une vitesse de 25 et même de 30 km : h. pourrait dans bien des cas être autorisée sans inconvénient, à condition de ralentir l'allure à tous les points dangereux. La limite de 30 km : h. a été admise notamment en Belgique par l'arrêté royal du 12 février 1893, approuvant le règlement de police relatif à l'exploitation des Chemins de fer vicinaux.

Dans l'intérieur des villes, la vitesse maxima des tramways est fixée, en deçà de la limite de 20 km : h., par le cahier des charges de la concession ou par des arrêtés préfectoraux ou municipaux. On a vu plus haut (t. I, p. 103) les valeurs le plus généralement adoptées aujourd'hui. Les ingénieurs devront commencer par se mettre d'accord sur ce point avec l'autorité compétente.

Quant aux chemins de fer ordinaires sur plate-forme séparée, ils sont soumis aux conditions générales d'exploitation imposées par l'ordonnance du 15 novembre 1846 et les arrêtés ministériels ultérieurs fixant, pour les diverses parties de chaque ligne, la vitesse maxima que peuvent prendre les trains de voyageurs, ainsi que la durée du trajet.

La limite de vitesse la plus élevée est celle admise sur le réseau du Nord, pour lequel le maximum a été fixé par l'arrêté ministériel du 30 juillet 1853 à 120 km : h.; pour les trains dits légers, la limite est abaissée à 80 km : h. par le règlement des mécaniciens homologué par décision ministérielle du 9 avril 1895. Sur les autres réseaux, la vitesse maxima varie en général, suivant les déclivités, le rayon des courbes et l'état de la voie de la section à parcourir, entre 40 et 80 ou 90 km : h. pour les trains de voyageurs et entre 20 et 50 km : h. pour les trains de marchandises. La difficulté de régler la marche des trains est naturellement beaucoup plus grande sur les chemins de fer que sur les tramways, parce qu'on y fait circuler des trains de vitesse très différente. En cas de retard, les règlements autorisent les mécaniciens à augmenter de moitié la vitesse résultant de l'horaire normal, sans cependant dépasser la vitesse maxima indiquée pour chaque section de ligne.

Les vitesses maxima sur les lignes métropolitaines sont déterminées par des règlements spéciaux. A Londres, la limite atteint 45 km : h.; en Amérique, 50 km : h.; à Paris, elle paraît devoir être fixée à des chiffres analogues.

Dans tous les cas, c'est la vitesse commerciale qui règle l'activité réelle de

la circulation. Pour la traction électrique, il est désirable de la rendre aussi élevée que possible (8 à 12 km : h. par exemple pour les tramways urbains, 20 à 25 km : h. pour les métropolitains), en augmentant l'accélération au départ comme on l'a vu plus haut, et en réduisant la durée des arrêts et ne les admettant qu'en des points fixes; en adoptant au maximum 5 ou 6 points d'arrêt par kilomètre sur un tramway, on n'impose qu'un trajet à pied insignifiant aux voyageurs et on leur assure en retour une grande célérité de transport.

Ces arrêts peuvent être de deux sortes différentes : les uns, espacés généralement d'au moins 1 km., peuvent être fermes, les points du parcours correspondants constituant de véritables stations, comme cela a lieu, par exemple, à Paris aux points de correspondance; les autres, prévus en des points intermédiaires, peuvent être seulement éventuels, c'est-à-dire que le mécanicien ne doit arrêter la voiture que si des voyageurs veulent monter ou descendre. Le tableau ci-dessous donne un exemple de service de ce genre.

TRAMWAY ÉLECTRIQUE DE PARIS A ROMAINVILLE

Désignation des points d'arrêt :

Romainville, garage n° 1		STATION.
— — 2		*Arrêt facultatif.*
— — 3		—
— — 4		—
Les Lilas, — 5. Chemin du Fort		—
— rue de Bagnolet (en dehors du carrefour)		—
— garage n° 6		—
— rue Weymiller (en dehors du carrefour)		—
— garage n° 7		—
— r. des Bruyères et de l'Égalité (en dehors du carr.)		
— garage n° 8		—
Lac Saint-Fargeau, naissance de la double voie		STATION.
Rue des Tourelles		*Arrêt facultatif.*
Rue Haxo	Candélabre n° 50	—
Rue Pelleport	— 42	—
Rue de la Chine	— 35	—
Place Gambetta	— 33	STATION.
Carrefour Sorbier	— 29	*Arrêt facultatif.*
Boulevard de Ménilmontant	— 11	STATION.
Lycée Voltaire	— 39	*Arrêt facultatif.*
Rue Servan	— 34	—
Rue Saint-Maur	— 29	—
Rue Oberkampf	— 24	—
Avenue Parmentier	— 20	—
Rue Gambey	— 16	—
Boulevard Richard-Lenoir	— 10	—
Avenue de la République, 1		STATION.

Entre stations, les arrêts peuvent être réduits à une dizaine de secondes ou même à un simple ralentissement, comme on l'a vu plus haut (p. 567). Aux stations, ils ne devraient pas durer en moyenne plus d'une $\frac{1}{2}$ minute pour les petites voitures et d'une minute pour les grands véhicules à impériale; on y arriverait, comme nous l'avons déjà fait remarquer, en supprimant le système, si

peu rationnel au point de vue de la célérité du service, du contrôle des correspondances aux stations.

C'est à cette condition seulement qu'on peut espérer réaliser un service rapide permettant de tirer tout le parti possible de la traction électrique.

Connaissant le nombre des arrêts et leur durée, on peut se fixer une valeur de la vitesse commerciale. Par exemple, si l'on admet une vitesse moyenne entre arrêts de 12 km : h. et 4 arrêts de 1/2 minute par kilomètre, la vitesse commerciale sera de $\frac{60}{60 + \frac{4 \times 12}{2}} \times 12 = 8,57$ km : h.

Graphique de marche. — La circulation des voitures sur les diverses lignes d'un réseau de tramways peut utilement être repré-

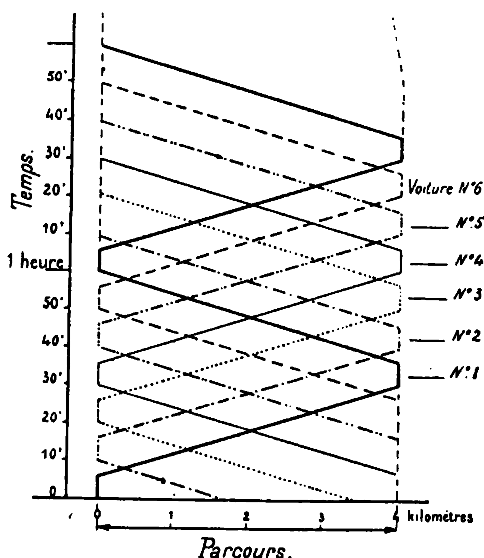


Fig. 858. — Graphique de marche à vitesse uniforme.

sentée, comme on le fait pour les chemins de fer, par un *graphique* de marche établi suivant la méthode due à Ibry, c'est-à-dire consistant en une épure sur laquelle on représente sous forme de lignes brisées les lieux des positions successives des véhicules en fonction du temps : les coordonnées représentent respectivement les temps et les distances des voitures à l'origine.

Dans le cas le plus simple, celui d'une vitesse uniforme entre arrêts, le graphique est formé de simples lignes droites à incli-

naison constante, comme celles de la figure 858 par exemple. Si la vitesse varie, chaque parcours sera figuré par une ligne brisée, l'inclinaison de chaque tronçon (tangente de l'angle qu'il forme avec l'axe des temps) représentant la vitesse correspondante. Le signe de l'inclinaison doit changer avec le sens de la marche.

Le graphique d'une journée entière comprend autant de lignes qu'il y a eu de parcours effectués soit dans un sens, soit dans l'autre; les voitures ou les trains marchant avec une même vitesse dans le sens de l'aller donnent lieu à une série de lignes brisées semblables et parallèles à celles de la première voiture; aux voitures marchant dans le sens du retour correspond une seconde série différente de lignes semblables entre elles.

Lorsqu'il s'agit de lignes sur plate-forme séparée où l'on admet des trains de voyageurs et des trains de marchandises de vitesses fort différentes, les graphiques deviennent plus compliqués et analogues à ceux des grandes lignes de chemins de fer, dont la figure 859 donne un exemple pour une portion eulement de la journée; les

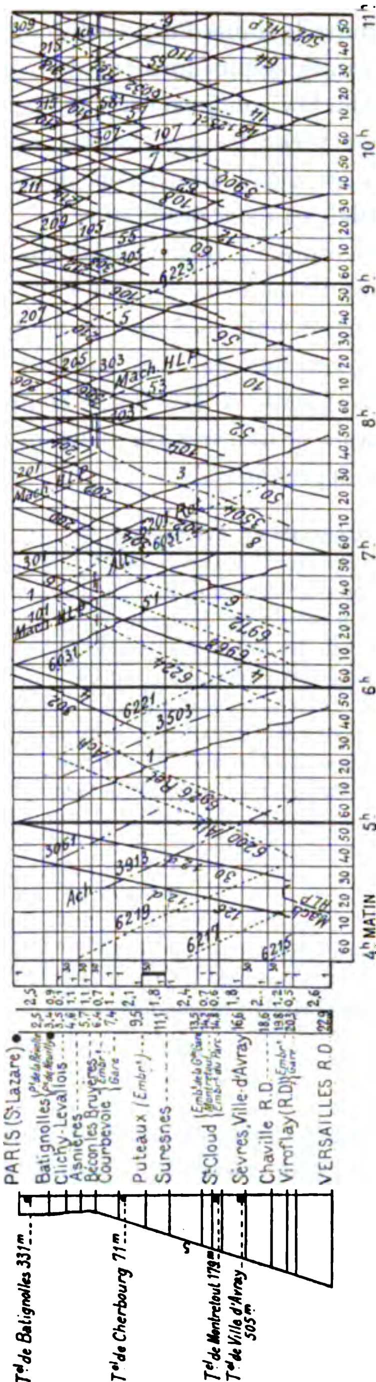


Fig. 859. — Spécimen de graphique de marche des trains sur une ligne de chemin de fer.

parcours de trains d'espèce différente sont tracés en traits différents.

Ces graphiques forment de véritables tableaux à double entrée dont les horizontales correspondent généralement aux diverses gares et les verticales aux heures de la journée. Les stationnements dans les gares ou stations d'arrêt sont figurés par des tronçons parallèles à l'axe des temps.

L'horaire est ainsi complètement représenté.

Sur les réseaux de tramways où l'on n'emploie pas la méthode des arrêts fixes, on doit se contenter de tracer les graphiques en supposant aux voitures sur tout leur parcours une vitesse constante et égale à la vitesse commerciale, comme le montre par exemple la figure 858 ; mais on ne peut avoir ainsi qu'une grossière approximation.

Croisements et évitements. — Ces graphiques permettent de déterminer convenablement les croisements lorsqu'il s'agit d'une ligne à simple voie ou de plusieurs lignes ayant des parties communes ou des traversées. Les dépassements indiqués par les graphiques ne peuvent avoir lieu qu'aux gares ou aux points où des voies d'évitement spéciales sont prévues dans ce but; il en est de même des croisements dans le cas d'une ligne à simple voie.

Les durées de stationnement seront généralement peu différentes aux deux extrémités de la ligne ; supposons-les simplement égales et appelons-les a.

Comme chaque voiture ou train doit faire la navette, il convient que la durée d'aller et retour additionnée de deux stationnements a soit un multiple de l'intervalle des départs t; on a donc la condition

$$2\left(\frac{l}{v} + a\right) = mt;$$

d'où

$$a = \frac{mt}{2} - \frac{l}{v}$$

ou, en exprimant la longueur l en kilomètres et la vitesse v en km : h.,

$$a = \frac{mt}{2} - 60\,\frac{l}{V}.$$

Le nombre entier m étant choisi de manière que $\frac{mt}{2}$ dépasse $\frac{l}{v}$ de moins de t., ce chiffre m indiquera le nombre de voitures nécessaire.

Si la valeur a ainsi trouvée paraît trop petite pour le bon fonctionnement du service, on augmentera un peu m ou la vitesse choisie V. Supposons, par exemple, qu'on ne puisse que réduire la vitesse et qu'on s'impose une durée d'arrêt a'; on remplacera m par l'entier immédiatement supérieur m' et on en déduira la vitesse

$$V' = \frac{2\,l}{m'\,t - 2\,a'} \times 60.$$

On pourra, si l'on préfère, admettre deux ou plusieurs véhicules ou trains en stationnement, ce qui donne pour chacun une durée d'arrêt $a + t$ ou $a + 2t$, etc.; mais cela exige des voitures en plus du nombre strictement nécessaire.

Une fois a et V fixés, on peut tracer sur le graphique toutes les lignes d'aller et de retour; leurs points de rencontre détermineront les positions à donner aux croisements. La distance d de ces croisements, c'est-à-dire celle des deux sommets des losanges formés par les lignes des deux systèmes, est parcourue pendant un temps égal au demi-intervalle, d'où sa valeur

$$d = \frac{V}{60} \frac{t}{2}.$$

Quant aux croisements extrêmes, leur distance aux extrémités, forcément plus petite, a pour valeur

$$d' = \frac{V}{60} \frac{t - a}{2}.$$

Si l'on admet des points d'arrêt fixes, il est assez rationnel d'en placer aux croisements. On déterminera ceux-ci de la même manière que ci-dessus en partant de la vitesse commerciale; puis on remplacera les lignes droites par des lignes brisées ayant pour inclinaison la vitesse moyenne entre arrêts et on marquera ceux-ci par des tronçons verticaux.

Considérons à titre d'exemple (fig. 858) une ligne suburbaine de 4 km. de longueur, comportant une vitesse commerciale de 11 km : h., et des intervalles de départ de 10 minutes. La durée d'un parcours est

$$\frac{l}{v} = \frac{4}{11} \times 60 = 22 \text{ minutes.}$$

En prenant 5 voitures, on aura pour la durée de stationnement

$$a = \frac{5 \times 10}{2} - 22 = 3 \text{ minutes.}$$

Cette durée est insuffisante pour assurer des départs bien réguliers. Proposons-nous d'obtenir des stationnements de 6 minutes, en réduisant la vitesse. Il faudra prendre $m' = 6$ voitures, d'où

$$V' = \frac{2 \times 4}{6 \times 10 - 2 \times 6} \times 60 = 10 \text{ km : h.}$$

la durée du parcours sera de

$$\frac{4}{60} \times 60 = 24 \text{ minutes.}$$

Au contraire, si l'on peut augmenter la vitesse, on conservera $m' = 5$ et l'on aura

$$V' = \frac{2 \times 4}{5 \times 10 - 2 \times 6} \times 60 = 12{,}63 \text{ km : h.};$$

la durée du parcours deviendra

$$\frac{4}{12{,}63} \times 60 = 19 \text{ minutes.}$$

Les espacements des croisements seront, par exemple, dans le premier de ces deux cas :

Fig. 860. — Graphique de marche sur les tramways de Versailles.

$$d = \frac{10}{60} \times \frac{10}{2} = 0,833 \text{ km.}$$

$$d' = \frac{10}{60} \times \frac{10 - 6}{2} = 0,333 \text{ km.}$$

Il y a 5 croisements en tout. Comme vérification, on a bien

$$2 \times 0,333 + 4 \times 0,833 = 0,666 + 3,342 = 4 \text{ km.}$$

Supposons qu'il y ait 2 arrêts d'une minute par kilomètre, soit 8 minutes perdues par parcours; la vitesse moyenne entre arrêts devra être de

$$\frac{4 \times 60}{24 - 8} = 15 \text{ km : h.}$$

et l'inclinaison des lignes de marche sera la même que si le parcours était effectué en 16 minutes. Ces arrêts étant supposés facultatifs, nous ne les avons pas représentés, et la figure n'indique que les vitesses moyennes.

Le cas de plusieurs lignes qui se croisent ou qui ont des tronçons communs se traite par des moyens analogues; mais les tâtonnements peuvent être plus nombreux pour arriver à déterminer au mieux les arrêts, les stationnements et les croisements : c'est une question d'espèce. La figure 860 représente, à titre d'exemple de ce genre, le graphique de marche établi au début de l'exploitation des tramways électriques de Versailles, dont le plan est donné par la figure 861. Le réseau comportait à cette époque 5 lignes différentes ayant un tronçon commun dans la rue Duplessis et l'avenue de Noailles; la rue Saint-Pierre est également commune à 4 lignes. Le graphique a été établi pour celles-ci en supposant une vitesse commerciale constante de 12 km : h. Les arrêts ont lieu en pleine voie, au gré des voyageurs.

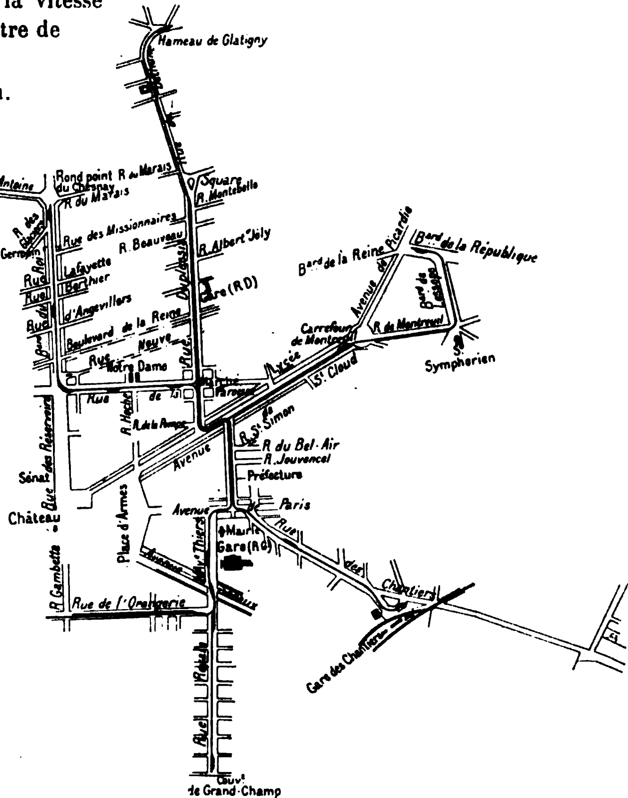


Fig. 861. — Plan des tramways de Versailles, à l'échelle de 1/30 000.

Sur les chemins de fer, où, comme nous l'avons dit, la question est infini-

ment plus complexe, l'établissement des graphiques est un travail très délicat; la traction électrique ne peut d'ailleurs apporter de modification aux règles suivies jusqu'ici qu'en ce qui concerne les vitesses, ainsi qu'on l'a vu plus haut.

§ 2. — Calcul de la puissance et de l'énergie consommées en chaque point d'un parcours

Généralités. — Pour l'établissement du matériel roulant et de l'usine génératrice, il est nécessaire de connaître les puissances maxima à fournir et, par suite, d'étudier la variation du courant pris par une voiture ou par un train aux divers points de son parcours.

Sur les tramways urbains ou les lignes suburbaines à exploitation analogue où le nombre des voitures en circulation est considérable, la puissance totale est la somme d'un nombre trop grand de puissances partielles et les horaires sont trop imparfaitement observés pour que le calcul en soit possible avec rigueur ; mais il n'en est pas de même pour les lignes de chemin de fer, où le nombre des trains se trouvant à la fois sur une ligne ou section de ligne alimentée par l'usine génératrice est très réduit.

En tout cas, quel que soit le mode d'exploitation, la connaissance des puissances dépensées le long du parcours d'un véhicule permet d'établir une donnée importante, la consommation moyenne d'énergie par voiture.

Nous allons donc traiter d'abord la question sous sa forme générale, en nous réservant d'y apporter par la suite des simplifications pratiques.

I. — Calcul complet

Le calcul complet consiste dans l'analyse détaillée des consommations d'énergie de la voiture en chaque point du profil en long. Nous rappellerons donc d'abord la façon dont celui-ci doit être établi.

Profil en long. — Lorsque le terrain est accidenté, on établit pour chaque ligne un *profil en long* qui en définit exactement les déclivités en portant bout à bout sur une même épure les profils de tous les

tronçons successifs supposés rabattus dans un même plan. On ajoute sur cette épure toutes les indications accessoires qui interviennent dans la détermination de l'effort résistant et de la puissance motrice nécessaire, ainsi que dans la marche des voitures.

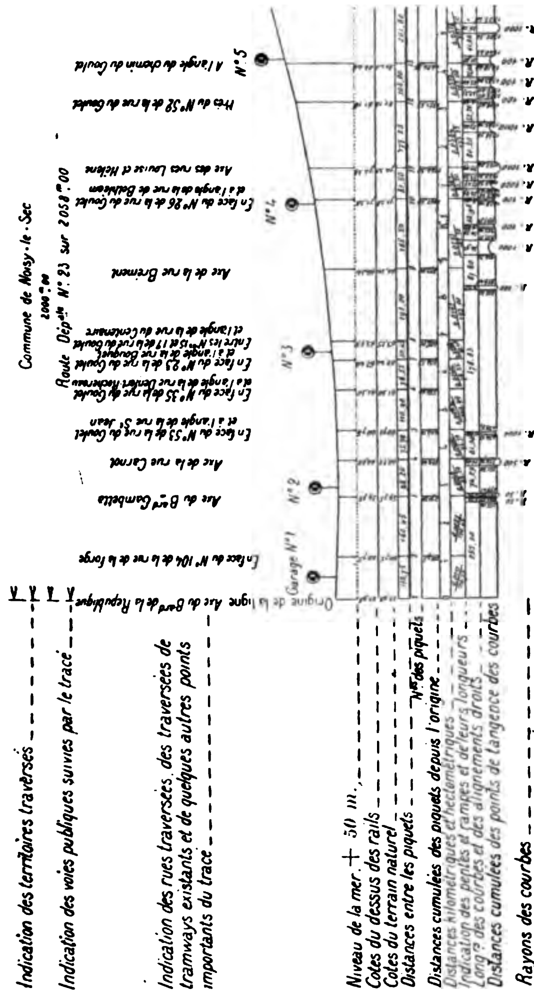


Fig. 862. — Disposition générale d'un profil en long de tramway.

La figure 862 donne un exemple de profil en long ainsi établi pour une ligne de tramway. Les données qui y figurent sont :

1° Un tracé en élévation à une échelle beaucoup plus grande pour les hauteurs que pour les distances;

2° Les indications définissant ce profil : hauteurs en mètres au-dessus d'un plan de comparaison, inclinaison des rampes et pentes en fractions de l'unité, longueur des rampes et pentes ;

3° Les données du tracé en plan : longueur des alignements et des courbes, et rayon de celles-ci; pour faciliter la lecture des distances, on joint à l'échelle kilométrique les valeurs des distances cumulées depuis l'origine exprimées en mètres ;

4° Accessoirement, l'indication des rues croisées, des aiguillages, changements de voie et évitements.

Les profils en long de chemins de fer sont analogues; ils ne contiennent pas l'indication des rues, mais celle des voies et lieux traversés; on y joint celle des ouvrages d'art et des signaux. Ces profils sont trop connus pour qu'il soit nécessaire d'en donner un exemple.

Conditions de parcours sans arrêt d'une voiture ou d'un train sur une ligne de profil connu; graphiques de vitesses, d'efforts et de courants. — Les données du profil en long, reproduites dans un tableau (p. 612, col. 1 à 3), servent au calcul des vitesses et des efforts de traction successifs d'un véhicule ou d'un train, parcourant seul et sans arrêt la ligne dans le sens de l'aller, puis dans celui du retour. Ce calcul se fait pour chaque tronçon présentant une courbure ou une inclinaison particulière suivant l'un ou l'autre des procédés indiqués plus haut (p. 429 à 446).

1re *méthode.* — On admet que la vitesse est constante pendant tout le parcours, en lui attribuant, dans le cas de moteurs en dérivation ou de moteurs polyphasés, la valeur maxima fixée par le cahier des charges, et, dans le cas de moteurs en série, une valeur moyenne inférieure de 10 à 20 p. 100.

Dans l'expression de la puissance consommée

$$P_{\text{watts}} = \frac{9,81}{3,6} F_{\text{kg.}} V_{\text{km : h.}} \times \frac{1}{\eta},$$

on donne au rendement η du moteur, engrenages compris, les valeurs indiquées aux divers degrés de charge par une courbe de rendement relevée sur des moteurs analogues, de puissance voisine et de bonne construction, ou mieux des valeurs un peu plus faibles, comme on le verra plus loin (§ 2); on en déduit le courant aux bornes nécessaire sur les divers tronçons, sous la tension d'alimentation U,

$$I_{\text{amp}} = \frac{P_{\text{watts}}}{U_{\text{volts}}}.$$

Dans le cas de moteurs polyphasés, cette équation doit être remplacée par

$$I_{\text{amp}} = \frac{P_{\text{watts}}}{q_1 U_{\text{volts}}} \times \frac{1}{\cos \varphi},$$

en appelant q_1 le nombre de phases primaire et φ le décalage correspondant approximativement au régime considéré.

Les deux tableaux ci-après (p. 612 à 615) donnent un exemple d'application

numérique dans le cas d'une voiture de 11 t., parcourant la ligne dont le profil

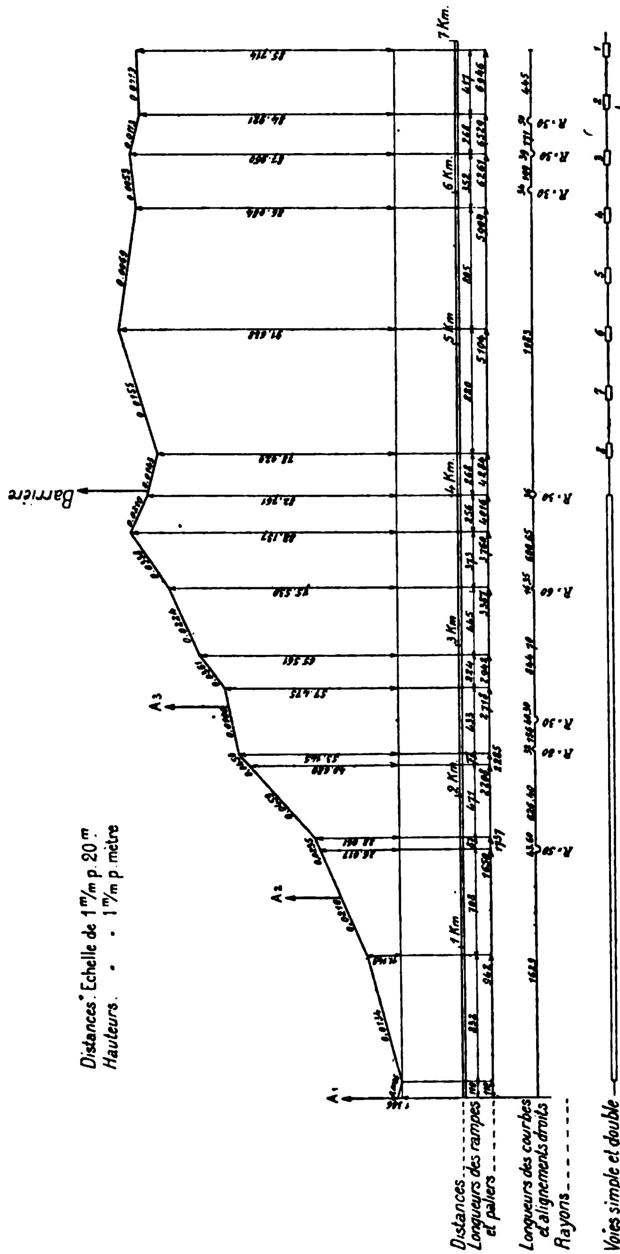


Fig. 863. — Profil de la ligne prise comme exemple dans les calculs des tableaux des pages 612 à 615.

est donné par la figure 863 et mue par deux moteurs en série de 15-25 chevaux dont le rendement est donné par la courbe de la figure 128 (t. I, p. 166).

PREMIÈRE MÉTH

CONDITIONS DU PARCOURS				COEFFICIENT DE RÉSISTANCE en millièmes ou en kilogrammes par tonne.					EFFORT RÉSISTANT total en kilogrammes
Longueur en kilomètres. L (1)	Inclinaison en rampe en m : m. i (2)	Rayon de courbure en mètres. R (3)	Accélération moyenne en m : s : s. $A = \frac{V'_e}{t}$ (4)	Roulement. $r = 10$ (5)	Pesanteur. $i \times 1000$ (6)	Courbure. $C = \frac{370}{R-10}$ (7)	Inertie. 102 A (8)	total. f (9)	F (10)
0,110	— 0,0126			10	— 12,6			— 2,6	— 28,
0,832	+ 0,0134			10	+ 13,4			+ 23,4	+ 257,
0,687	+ 0,0210			10	+ 21			+ 31	+ 341
0,021	+ 0,0210	50		10	+ 21	9,2		+ 40,2	+ 440
0,0226	+ 0,0235	50		10	+ 23,5	9,2		+ 42,7	+ 470
0,0644	+ 0,0235			10	+ 23,5			+ 33,5	+ 368,
0,471	+ 0,0459			10	+ 45,9			+ 55,9	+ 614,
0,077	+ 0,0450			10	+ 45			+ 55	+ 605
0,014	+ 0,0100			10	+ 10			+ 20	+ 220
0,032	+ 0,0100	80		10	+ 10	5,25		+ 25,2	+ 277
0,156	+ 0,0100			10	+ 10			+ 20	+ 220
0,0403	+ 0,0100	30		10	+ 10	18,2		+ 38,2	+ 421
0,1907	+ 0,0100			10	+ 10			+ 20	+ 220
0,224	+ 0,0361			10	+ 36,1			+ 46,1	+ 507,
0,430	+ 0,0224			10	+ 22,4			+ 32,4	+ 356,
0,015	+ 0,0224	60	Pour mémoire.	10	+ 22,4	7,4	Pour mémoire.	+ 39,8	+ 440
0,00135	+ 0,0338	60		10	+ 33,8	7,4		+ 51,2	+ 560
0,37165	+ 0,0338			10	+ 33,8			+ 43,8	+ 481,
0,229	— 0,0210			10	— 21			— 11	— 121
0,027	— 0,0210	30		10	— 21	18,2		+ 7,2	+ 79
0,009	— 0,0143	30		10	— 14,3	18,2		+ 14	+ 154
0,259	— 0,0143			10	— 14,3			— 4,3	— 47,
0,820	+ 0,0155			10	+ 15,5			+ 25,5	+ 280,
0,805	— 0,0069			10	— 6,9			+ 3,1	+ 34,
0,099	+ 0,0053			10	+ 5,3			+ 15,3	+ 168,
0,034	+ 0,0053	30		10	+ 5,3	18,2		+ 33,5	+ 370
0,199	+ 0,0053			10	+ 5,3			+ 15,3	+ 168,
0,020	+ 0,0053	30		10	+ 5,3	18,2		+ 33,5	+ 370
0,019	— 0,0113	30		10	— 11,3	18,2		+ 17	+ 187
0,171	— 0,0113			10	— 11,3			— 1,3	— 14,
0,050	— 0,0113	30		10	— 11,3	18,2		+ 17	+ 187
0,028	— 0,0113			10	— 11,3			— 1,3	— 14,
0,417	+ 0,0019			10	+ 1,9			+ 11,9	+ 130,

E CALCUL. — ALLER

VITESSE MOYENNE		PUISSANCE MÉCANIQUE dépensée.		RENDEMENT des moteurs.	PUISSANCE ÉLECTRIQUE AUX BORNES en watts.	TENSION DE DISTRIBUTION en volts.	COURANT en ampères.	ÉNERGIE dépensée en watts-heures.	OBSERVATIONS
en kilomètres à l'heure. V (11)	en mètres par seconde. $V' = \frac{V}{3,6}$ (12)	en chevaux. $\frac{FV'}{75}$ (13)	en watts. $P = 9,81\,FV'$ (14)	$\eta \times 100$ (15)	$P' = \frac{P}{\eta}$ (16)	U (17)	$\frac{P'}{U}$ (18)	$\frac{P'L}{V}$ (19)	
12	3,33	0	0		0	500	0	0	Pas de récupération.
—	—	11,43	8 417	79	10 658	—	21,3	739	
—	—	15,14	11 150	79	14 114	—	28,2	808	
—	—	21,2	14 400	78	18 500	—	37	32	
—	—	22,5	15 400	77	20 000	—	40	37,5	
—	—	16,36	12 049	78,8	15 290	—	30,6	82	
—	—	27,30	20 107	74	27 170	—	54,3	1 066	
—	—	26,86	19 783	74	26 730	—	53,4	171	
—	—	9,76	7 194	78	9 223	—	18,4	10,8	
—	—	13,3	9 100	79	11 500	—	23	30,5	
—	—	9,76	7 194	78	9 223	—	18,4	120	
—	—	20,3	13 800	78	17 700	—	35,4	59	
—	—	9,76	7194	78	9 223	—	18,4	146,5	
—	—	22,51	16 582	76,9	21 565	—	42,1	402	
—	—	15,82	11 654	78,9	14 785	—	29,6	530	
—	—	21,2	14 400	78	14 830	—	36,8	21,5	
—	—	26,7	18 400	75	24 600	—	49,2	2,75	
—	—	21,39	15 754	77,2	20 410	—	40,8	632	
—	—	0	0		0	—	0	0	Récupération possible.
—	—	3,8	2 590	35	7 400	—	14,8	16,6	
16	4,44	9,36	6 700	77	8 680	—	17,3	4,9	
—	—	0	0		0	—	0	0	Récupération possible.
—	—	16,63	12 229	78,8	15 510	—	31	794	
—	—	2,02	1 486	25	5 930	—	11,8	300	
—	—	9,98	7 337	78,2	9 835	—	18,8	58,6	
—	—	21,8	16030	77	20 700	—	41,4	44,2	
—	—	9,98	7 337	78,2	9 385	—	18,8	116,7	
—	—	21,8	16 030	77	20 700	—	41,4	26,3	
—	—	11	8 140	79	10 280	—	20,5	13,8	
—	—	0	0		0	—	0	0	Pas de récupération.
—	—	9	8 140	79	10 280	—	20,5	32	
—	—	0	0		0	—	0	0	Pas de récupération.
—	—	7,76	5 700	72	7 900	—	15,8	181,7	6 450 watts-heures pour 76,4 t.-km., soit 84 watts-heures par t.-km.
					Total.			6 450	

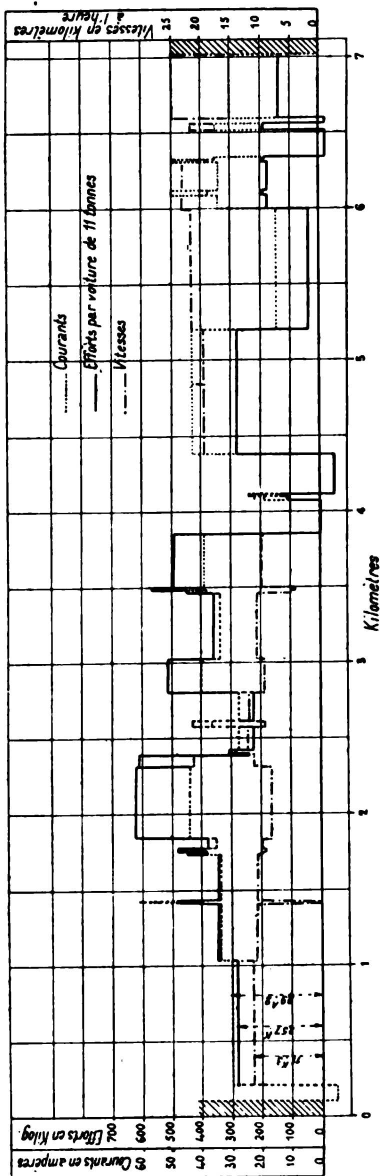
PREMIÈRE MÉTHO

CONDITIONS DU PARCOURS				COEFFICIENT DE RÉSISTANCE en millièmes ou en kilogrammes par tonne.					EFFORT RÉSISTANT total en kilogrammes pour 11 tonnes.
Longueur en kilomètres. L (1)	Inclinaison en rampe en m : m. i (2)	Rayon de courbure en mètres. R (3)	Accélération moyenne en m : s : s. $A = \frac{V_0}{t}$ (4)	Roulement. $r = 10$ (5)	Pesanteur. $i \times 1000$ (6)	Courbure. $C = \frac{370}{R-10}$ (7)	Inertie. 102 A (8)	total. f (9)	F (10)
0,417	— 0,0019			10	— 1,9			+ 8,1	+ 89
0,028	+ 0,0113			10	+ 11,3			+ 21,3	+ 234
0,050	+ 0,0113	30		10	+ 11,3	18,2		+ 39,5	+ 435
0,171	+ 0,0113			10	+ 11,3			+ 21,3	+ 234
0,019	+ 0,0113	30		10	+ 11,3	18,2		+ 29,5	+ 435
0,020	— 0,0053	30		10	— 5,3	18,2		+ 23	+ 254
0,199	— 0,0053			10	— 5,3			+ 4,7	+ 52
0,034	— 0,0053	30		10	— 5,3	18,2		+ 23	+ 254
0,099	— 0,0053			10	— 5,3			+ 4,7	+ 52
0,805	+ 0,0069			10	+ 6,9			+ 16,9	+ 185
0,820	— 0,0155			10	— 15,5			— 5,5	— 60
0,259	+ 0,0143			10	+ 14,3			+ 24,3	+ 267
0,009	+ 0,0143	30		10	+ 14,3	18,2		+ 42,5	+ 470
0,027	+ 0,0210	30		10	+ 21	18,2		+ 49,2	+ 542
0,229	+ 0,0210			10	+ 21			+ 31	+ 341
0,37165	— 0,0338			10	— 33,8			— 23,8	— 262
0,00135	— 0,0338	60	Pour mémoire.	10	— 33,8	7,4	Pour mémoire.	— 16,4	— 180
0,015	— 0,0224	60		10	— 22,4	7,4		— 5	— 55
0,430	— 0,0224			10	— 22,4			— 12,4	— 136
0,224	— 0,0361			10	— 36,1			— 26,1	— 287
0,1907	— 0,0100			10	— 10			0	0
0,0403	— 0,0100	30		10	— 10	18,2		+ 18,2	+ 202
0,156	— 0,0100			10	— 10			0	0
0,032	— 0,0100	80		10	— 10	5,25		+ 5,3	+ 58
0,014	— 0,0100			10	— 10			0	0
0,077	— 0,0450			10	— 45			— 35	— 385
0,471	— 0,0459			10	— 45,9			— 35,9	— 395
0,0644	— 0,0235			10	— 23,5			— 13,5	— 148
0,0226	— 0,0235	50		10	— 23,5	9,2		— 4,3	— 47
0,021	— 0,0210	50		10	— 21	9,2		— 1,8	— 20
0,687	— 0,0210			10	— 21			— 11	— 121
0,832	— 0,0134			10	— 13,4			— 3,4	— 37
0,110	+ 0,0126			10	+ 12,6			+ 22,6	+ 249

CALCUL. — RETOUR

VITESSE MOYENNE		PUISSANCE MÉCANIQUE dépensée.		RENDEMENT des moteurs.	PUISSANCE ÉLECTRIQUE AUX BORNES en watts.	TENSION DE DISTRIBUTION en volts.	COURANT en ampères.	ÉNERGIE dépensée en watts-heures.	OBSERVATIONS
à l'heure.	en mètres par seconde.	en chevaux.	en watts.						
V	$V' = \frac{V}{3,6}$	$\frac{FV'}{75}$	$P = 9,81\,FV'$	$\eta \times 100$	$P' = \frac{P}{\eta}$	U	$\frac{P'}{U}$	$\frac{P'L}{V}$	
(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	
16	4,44	5,34	3 871	58	6 674	500	13,3	111	
—	—	14,04	10 179	79	12 885	—	25,77	17,5	
—	—	25,7	19 200	75	25 600	—	51,2	80	
—	—	14,04	10 179	79	12 885	—	25,77	138	
—	—	25,7	19 200	75	25 600	—	51,2	30	
—	—	15	11 200	79	14 200	—	28,4	17	
—	—	3,12	2 262	36	6 283	—	12,6	78	
—	—	15	11 200	79	14 200	—	28,4	27	
—	—	3,12	2 262	36	6 283	—	12,6	38,8	
—	—	11,10	8 047	79	10 186	—	20,4	513	
—	—	0	0		0	—	0	0	Récupération possible.
—	—	16,02	11 614	79	14 701	—	29,4	23,8	
—	—	27,7	20 690	76	27 200	—	54,4	15,3	
12	3,33	24,1	17 900	76	23 600	—	47,2	53	
—	—	15	11 150	79	14 114	—	28,2	26,8	
—	—	0	0		0	—	0	0	Récupération possible.
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	
—	—	8,9	6 600	77	8 580	—	17,1	28,7	
—	—	0	0		0	—	0	0	
—	—	2,6	1 910	30	6 370	—	12,7	17	
—	—	0	0		0	—	0	0	
—	—	0	0		0	—	0	0	Récupération possible.
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	0	0		0	—	0	0	
—	—	0	0		0	—	0	0	Récupération possible.
—	—	0	0		0	—	0	0	—
—	—	10,95	8 142	79	10 306	—	20,6	95	1 310 watts-heures pour 76,4 t.-km., soit 17,1 watts-heures par t.-km.
					Total.			1 310	

Cette méthode, suffisante dans le cas de moteurs à vitesse constante et couplage invariable, est plus ou moins inexacte dans le cas de moteurs en série,



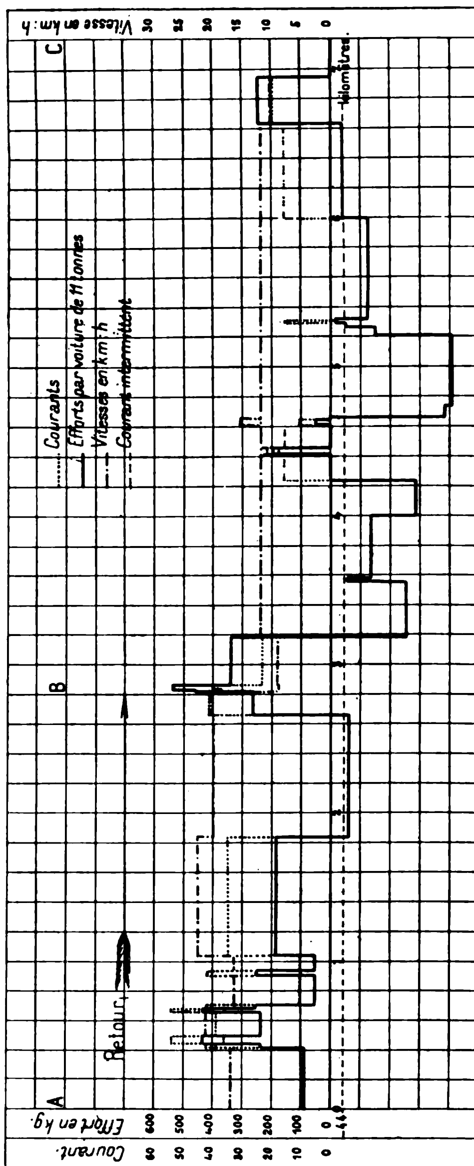


Fig. 864. Fig. 865.

Fig. 864 et 865. — Graphiques des efforts, des courants et des vitesses à l'aller et au retour, dressé d'après le tableau des pages 618 et 619.

surtout quand on les règle par la méthode série-parallèle, parce qu'elle ne

tient pas compte des variations de vitesse, qui sont souvent fort importantes.

2° *méthode.* — Connaissant les efforts de traction nécessaires et les principales vitesses, on choisit, suivant les indications données plus haut (p. 481), le ou les moteurs à adopter; on détermine ensuite les courants et les vitesses à l'aide des courbes caractéristiques connues ou fournies par le constructeur et complétées par les courbes de régulation intermédiaires; puis, sur chaque tronçon, on choisit le régime de marche sans rhéostat et le couplage qui maintient la vitesse au-dessous de la limite maxima fixée par le cahier des charges.

Le tableau ci-après (p. 618 et 619) et les figures 864 et 865 indiquent le mode d'application de cette méthode sur le même parcours que précédemment. La voiture, pesant 11 t., est équipée avec 2 moteurs ayant pour courbes complètes celles de la figure 568 (p. 155). Les graphiques résument les valeurs successives de l'effort, du courant et de la vitesse tout le long du parcours à l'aller, puis au retour; en négligeant d'abord les effets d'inertie étudiés plus haut (p. 561), dont on ne peut tenir compte qu'exceptionnellement, les valeurs de ces diverses quantités sont constantes sur chaque tronçon et les lignes représentatives sont formées de parties horizontales.

Ces graphiques appellent deux remarques de détail :

1° *Sur les pentes*, si les efforts deviennent négatifs, ils doivent être portés au-dessous de l'axe des abscisses; l'intensité de courant, qui au moment où l'effort à la jante est nul a une valeur I_o, s'annule lorsque cet effort, devenu négatif, atteint la valeur $-\varphi$ qui représente les frottements du mécanisme (voir p. 453). Entre les valeurs 0 et $-\varphi$, elle varie suivant une loi définie par la prolongation de la courbe d'effort, qu'on peut aisément tracer au sentiment sur l'épure de la figure 568[1].

Dans l'exemple considéré, nous avons admis un frottement de mécanisme de 2 kg. par tonne et par moteur, ce qui fait 44 kg. pour la voiture automobile de 11 t.

Au dessous de la valeur $-\varphi$, on supprime le courant[2] et l'énergie mécanique disponible est, soit utilisée à produire une accélération, soit consommée par les freins si l'on est obligé de les appliquer.

2° Sur les parties de parcours où les moteurs en fonctionnement permanent imprimeraient au véhicule une vitesse supérieure à la limite maxima autorisée, nous avons dû admettre qu'on interromprait périodiquement le courant de façon à ne le faire passer que pendant une certaine fraction α du temps ; si l'on admet que ces interruptions soient assez fréquentes pour maintenir une vitesse sensiblement constante, on peut calculer la fraction α en exprimant l'égalité du travail moteur et du travail résistant.

Appelons encore β le coefficient de traction en palier, i la déclivité (positive en rampe), φ le coefficient de résistance dû aux frottements à vide du mécanisme, P le poids du véhicule, F l'effort moteur produit par un courant I,

[1] On peut, si l'on préfère, admettre sans crainte d'erreur que I varie linéairement entre I_o et 0.

[2] Sauf dans le cas de la récupération, étudié plus loin au § 4.

DEUXIÈME MÉTHODE DE CALCUL

CONDITIONS DU PARCOURS			COEFFICIENT DE RÉSISTANCE en millièmes ou en kg. par tonne.				ALLER							
Longueur en km. L (1)	Inclinaison en m : m. i (2)	Rayon de courbure en mètres. R (3)	Roulement r (4)	Pesanteur. $i \times 1000$ (5)	Courbure. C (6)	total. f (7)	EFFORT RÉSISTANT TOTAL en kilogrammes pour 11 tonnes. F (8)	QUANTITÉS DÉDUITES des courbes. Courant en ampères. I Moteurs couplés en Série. (9)	Parallèle. (10)	Vitesse vraie en km : h V (11)	POSITION DE LA MANETTE du régulateur. (12)	TENSION DE DISTRIBUTION en volts. U (13)	PUISSANCE ÉLECTRIQUE aux bornes en watts. $P' = UI$ (14)	ÉNERGIE DÉPENSÉE en watts-heures. $\frac{P'L}{V}$ (15)
0,110	—0,0126		10	— 12,6		— 2,6	— 28,6			12	A	500		0
0,832	+0,0134		10	+ 13,4		+23,4	+ 257,4	29,2		11,3	—	—	14 600	1 390
0,687	+0,0210		10	+ 21		+31	+ 341	33		10,5	—	—	16 500	1 400
0,021	+0,0210	50	10	+ 21	9,2	+40,2	+ 440	37		10	—	—	18 500	38
0,0226	+0,0235	50	10	+ 23,5	9,2	+42,7	+ 470	38		9,5	—	—	19 000	45
0,0644	+0,0235		10	+ 23,5		+33,5	+ 368,5	34		10	—	—	17 000	150
0,471	+0,0459		10	+ 45,9		+55,9	+ 614,9	42,8		8,5	—	—	21 400	1 184
0,077	+0,0450		10	+ 45		+55	+ 605	42		11,5	—	—	21 000	140
0,014	+0,0100		10	+ 10		+20	+ 220	27		12	—	—	13 500	15,8
0,032	+0,0100	80	10	+ 10	5,25	+25,2	+ 277	30		11	—	—	15 000	43,4
0,156	+0,0100		10	+ 10		+20	+ 220	27		12	—	—	13 500	176
0,0403	+0,0100	30	10	+ 10	18,2	+38,2	+ 421	36		9,8	—	—	18 000	74
0,1907	+0,0100		10	+ 10		+20	+ 220	27		12	—	—	13 500	213
0,224	+0,0361		10	+ 36,1		+46,1	+ 507,1	39		9,5	—	—	19 500	458
0,430	+0,0224		10	+ 22,4		+32,4	+ 356,4	33,5		10,5	—	—	16 750	685
0,015	+0,0224	60	10	+ 22,4	7,4	+39,8	+ 440	37		10	—	—	18 500	27,7
0,00135	+0,0338	60	10	+ 33,8	7,4	+51,2	+ 560	41		8,8	—	—	20 500	3,1
0,37165	+0,0338		10	+ 33,8		+43,8	+ 481,8	38		9,6	—	—	19 000	733
0,229	—0,0210		10	— 21		—11	— 121			12	—	—	0	0
0,027	—0,0210	30	10	— 21	18,2	+ 7,2	+ 79	19		11	—	—	9 500	23,3
0,009	—0,0143	30	10	— 14,3	18,2	+14	+ 154		33	12	C	—	16 500	6,2
0,259	—0,0143		10	— 14,3		— 4,3	— 47,3			20	—	—	0	0
0,820	+0,0155		10	+ 15,5		+25,5	+ 280,5		42	20	—	—	21 000	862
0,805	—0,0069		10	— 6,9		+ 3,1	+ 34,1	14		22	A	—	7 000	255
0,099	+0,0053		10	+ 5,3		+15,3	+ 168,3		33	23	C	—	19 000	82
0,034	+0,0053	30	10	+ 5,3	18,2	+33,5	+ 370		49	19	—	—	24 500	43,7
0,199	+0,0053		10	+ 5,3		+15,3	+ 168,3		33	23	—	—	16 500	141
0,020	+0,0053	30	10	+ 5,3	18,2	+33,5	+ 370		49	19	—	—	24 500	25,7
0,019	—0,0113	30	10	— 11,3	18,2	+17	+ 187		35	22	—	—	17 500	15,2
0,171	—0,0113		10	— 11,3		— 1,3	— 14,3			22	—	—	0	0
0,050	—0,0113	30	10	— 11,3	18,2	+17	+ 187		35	22	—	—	17 500	39,7
0,028	—0,0113		10	— 11,3		— 1,3	— 14,3				—	—	0	0
0,417	+0,0019		10	+ 1,9		+11,9	+ 130,9		30	25	—	—	15 000	250
6,946								Total.						8 519,8

· ALLER ET RETOUR

OBSERVATIONS (16)	RETOUR — EFFORT RÉSISTANT TOTAL en kilogrammes pour 11 tonnes. F (8 *bis*)	QUANTITÉS DÉDUITES des courbes. Courant en ampères. I Moteurs couplés en Série. (9 *bis*)	Parallèle. (10 *bis*)	Vitesse vraie en km : h. V (11 *bis*)	POSITION DE LA MANETTE du régulateur. (12 *bis*)	TENSION DE DISTRIBUTION en volts. U (13 *bis*)	PUISSANCE ÉLECTRIQUE aux bornes en watts. P' = VI (14 *bis*)	ÉNERGIE DÉPENSÉE en watts-heures. $\frac{P'L}{V}$ (15 *bis*)	OBSERVATIONS (16 *bis*)
	+248,6	20		10	A	500	10 000	110	
	— 37,4			12	—	—	0	0	
	—121			12	—	–	0	0	Récupération possible.
	— 19 8			12	—	—	0	0	
	— 47,3			12	—	—	0	0	Descente possible sans courant.
	—148,5			12	—	—	0	0	Récupération possible.
	- 394,9			12	—	—	0	0	—
	—385			12	—	—	0	0	—
	0			12	—	—	0	0	
	+ 57,75	11		15,7	—	—	5 500	11,2	Il faudra interrompre le courant de temps en temps.
	0			12	—	—	0	0	
	+202,2	18		10,8	—	—	9 000	35,4	
	0			12	—	—	0	0	
	—287,1			12	—	—	0	0	Récupération possible.
	—136,4			12	—	—	0	0	—
	— 55			12	—	—	0	0	Descente possible sans courant.
	—180,4			12	—	—	0	0	Récupération possible.
	—261,8			12	—	—	0	0	—
Récupération possible.	+341	23,3		9	—	—	11 650	281,2	
	+541,2	40,2		8,9	B	—	20 100	61	
	+467,5	37,6		9,4	—	—	18 800	18	
Descente possible sans courant.	+267,3		41,2	20,6	C	—	20 600	259	
	— 60,5			20	—	—	0	0	Descente possible sans courant.
	+185,9		34,8	22,5	—	—	17 400	622,5	
	+ 51,7	10,5		16,4	A	—	5 250	31,7	
	+281,9		40	20,8	C	—	20 000	32,7	
	+ 51,7	10,5		16,4	A	—	5 250	63,7	
	+251,9		40	20,8	C	—	20 000	19,2	
	+434,5		54	18,1	—	—	27 000	28,3	
	+254,8		38,7	21,2	—	—	19 350	156	
	+434,5		54	18,1	—	—	27 000	74,5	
	+234,3		38,7	21,2	—	—	19 350	25,6	
	+ 89,1	10		17	A	—	5 000	122,6	
Soit 112 w.-h. par tonne-km.				Total.				1 952,6	Soit 24,4 w.-h. par tonne-km.

UI la puissance électrique correspondante, t la durée d'application de ce courant, t' celle du fonctionnement à vide, V la vitesse limite. On a

$$P(\beta + i)\,t + P(\beta + i + \varphi)\,t' = Ft,$$

d'où l'on déduit

$$\alpha = \frac{t}{t + t'} = \frac{P(\varphi + \beta + i)}{F + P\varphi}.$$

A la vitesse de 12 km : h., par exemple, on a I = 16 amp., F = 147 kg.

La dépense d'énergie, sur un trajet de longueur L parcouru dans ces conditions avec la vitesse limite V, fixée par exemple à 12 km : h. à l'intérieur de la ville et à 20 km : h. à l'extérieur, sera

$$W = \alpha \frac{L}{V} UI.$$

C'est ainsi qu'ont été calculés les chiffres du tableau dans les parcours tracés en traits pointillés discontinus sur l'épure.

Nous avons pris comme exemple une ligne de tramway. Le calcul se fait de même pour les lignes de chemins de fer, en tenant compte de la différence des coefficients de traction ; sur les profils accidentés où la vitesse varie, on peut tenir compte des variations de la résistance qui en résultent en traçant d'abord pour le train choisi, comme nous l'avons expliqué plus haut (p. 471), une épure des vitesses, des efforts et des courants sur diverses rampes. L'emploi de cette épure dispense alors des calculs de la première moitié du tableau, à condition de remplacer les courbes par des rampes équivalentes (1 mm : m. de rampe pour 1 kg : t. d'effort supplémentaire). Le tableau à dresser se réduit ainsi à quelques colonnes, suivant le schéma ci-dessous (p. 621).

Parcours sur une ligne à arrêts nombreux en tenant compte des ralentissements et démarrages. — Jusqu'ici nous ne nous sommes occupés que des efforts et courants applicables à une voiture ou à un train parcourant la ligne d'un bout à l'autre sans arrêt, d'abord dans un sens, puis dans l'autre. Sur les lignes à arrêts fréquents, il y a lieu de tenir compte en outre des arrêts, supposés effectués en des points déterminés, et des démarrages consécutifs à ces arrêts. La façon de traiter ce calcul est toute différente suivant qu'il s'agit de tramways, pour lesquels la précision est impossible et peu utile, ou de chemins de fer, pour les-

quels elle est au contraire réalisable et même opportune. Nous traiterons donc séparément ces deux cas

1° *Tramways.* — On peut d'abord se proposer, tout en conservant le principe de l'étude des accélérations à l'arrêt et au départ, de chercher à en simplifier l'application. Dans ce but on peut employer la méthode suivante.

CONDITIONS DU PARCOURS			CALCUL de l'inclinaison fictive.		VALEURS CALCULÉES D'APRÈS L'ÉPURE							OBSERVATIONS
Longueur en kilomètres.	Inclinaison en millimètres : m.	Rayon de courbure en mètres.	Rampe supplémentaire équivalente.	Inclinaison totale fictive.	Position du régulateur.	Courant total en ampères.	Vitesse à 500 volts.	Voltage de la ligne.	Vitesse corrigée.	Puissance électrique dépensée.	Énergie dépensée.	

Démarrages. — On suppose l'accélération constante pendant la mise en vitesse et ayant une valeur moyenne telle qu'elle imprime au véhicule la même vitesse finale V que l'accélération vraie. La courbe de vitesse vraie *amn*, tracée en pointillé sur la figure 866, est ainsi remplacée pour simplifier par sa corde tracée en traits pleins *apn*.

L'espace parcouru pendant la durée t_0 de cette mise en vitesse est

$$e = \frac{1}{2} V t_0$$

et l'effort accélérateur moyen

$$F' = \frac{102}{3,6} P' \frac{V}{t_0}.$$

Le courant moyen correspondant se déduit de l'effort total

$$F = F' + (\beta + i) P,$$

soit à l'aide de la courbe d'efforts des moteurs, si on la possède, soit par la formule de la page 610, qui devient ici

$$I_m = \frac{9,81}{3,6} \frac{F\left(\frac{V}{2}\right)}{\eta' U},$$

η' étant un coefficient de rendement empirique de démarrage qui ne dépasse guère avec la méthode du rhéostat 0,40 à 0,60, et avec la méthode série-parallèle 0,50 à 0,60 sur les tramways et 0,60 à 0,70 sur les chemins de fer.

Ayant ainsi le courant moyen, représenté par la droite *cd*, pendant la mise en vitesse, on peut tracer approximativement une courbe de courant donnant la même moyenne, tout en se rapprochant des formes types étudiées au chapitre XIII. Par exemple, dans le cas de la régulation série-parallèle, on peut admettre que, pendant la première moitié *ak* du démarrage, le courant pris par chaque moteur est constant, le courant total passant du simple au double au milieu de cet intervalle, et que, pendant la seconde moitié du démarrage, il décroît linéairement jusqu'au régime normal *e*. En donnant à la ligne brisée ainsi définie *afghie* même aire totale qu'au rectangle *abcde*, on a une idée plus approchée de la loi de variation. Celle-ci diffère assez peu d'un simple triangle, et du reste la valeur du maximum importe plus que la forme ; on peut donc remplacer simplement la portion *bcde* du rectangle située au-dessus de la ligne de régime moyen par un triangle isocèle de hauteur double. Au point de vue des machines génératrices, leur inertie ne permettant pas de suivre des variations si courtes, on peut se contenter du rectangle moyen lui-même.

Arrêts. — D'autre part, on doit admettre à chaque arrêt une certaine durée de ralentissement t_0, pendant laquelle, si on laisse la voiture aller à la dérive et si l'on néglige la variation de la résistance de l'air avec la vitesse, l'accélération négative reste sensiblement constante ; si le ralentissement va jusqu'à l'arrêt, la vitesse moyenne est donc égale à la moitié de la vitesse initiale et l'espace parcouru pendant le temps total d'arrêt t a pour valeur

$$x = \frac{V'_0 t}{2}.$$

La durée t s'obtient en égalant l'effort d'accélération à l'effort résistant, soit en kg. par tonne

$$\frac{1\,000}{g}\frac{dV}{dt} = \beta + i,$$

β étant le coefficient total en palier et i l'inclinaison de la rampe ; d'où, en faisant $\frac{dV}{dt} = \frac{V_0}{t}$,

$$t = \frac{102}{\beta + i} V^0,$$

$$x = \frac{102}{2(\beta + i)} V'^2_0.$$

On pourra s'aider pour ce calcul du tableau de la page 448 qui donne les valeurs de $\frac{102}{2} V'^2_0$.

Si le temps du ralentissement ainsi calculé t est inférieur ou égal à la limite t_0 admise pour le ralentissement, on peut se contenter de supprimer le courant sans appliquer les freins et on récupère ainsi le travail d'inertie ; c'est le but

des rampes établies aux abords des stations des chemins de fer tubulaires électriques de Londres.

Au contraire, si t dépasse t_0, on doit réduire la durée de ralentissement à cette valeur en appliquant les freins, et le courant reste ainsi supprimé seulement pendant ce temps.

La figure 866 et le tableau des pages 624 et 625 donnent un exemple d'application de cette méthode rapide à deux arrêts suivis de démarrage de notre voiture de 11 t. (poids d'inertie 13,5 t.) sur rampe de 21 mm : m., puis sur pente de 10 mm : m. Nous avons admis pour cet exemple l'arrêt par ralentissement spontané et nous nous sommes imposé la condition de démarrer en 10 secondes dans les deux cas ; la vitesse normale étant de 12 km : h., la

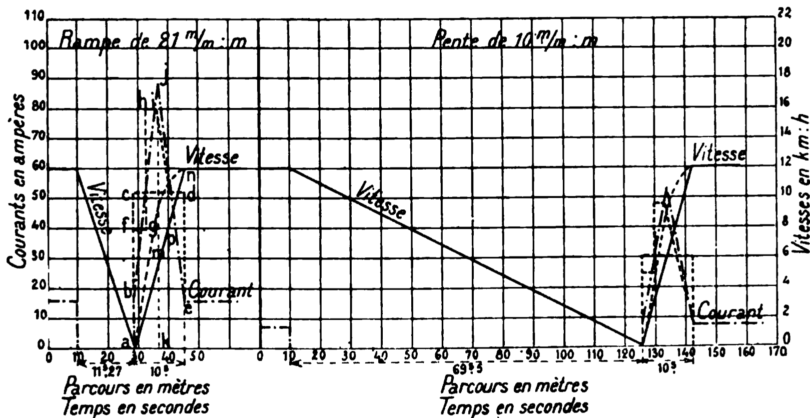


Fig. 866. — Exemples de ralentissements spontanés d'une voiture de tramway jusqu'à l'arrêt suivis de démarrages en 10 secondes à accélération constante. — Variations de vitesse et de courant dans diverses hypothèses.

vitesse moyenne pendant l'accélération ou le ralentissement est supposée de 6 km : h. Nous avons compté 6 kg. par tonne pour la résistance du mécanisme pendant l'arrêt.

Les formules précédentes donnent les résultats portés dans la colonne « Observations » du tableau. Nous avons conservé à celui-ci, dans un but d'uniformité, la même ordonnance que pour les tableaux des pages 618-619, bien qu'en fait les différentes quantités se présentent suivant un autre ordre de calcul.

On voit combien la durée du ralentissement spontané est longue sur les pentes, bien que nous ayons admis pour la résistance du mécanisme le chiffre exagéré de 6 kg : t. ; aussi ne peut-on se passer de frein que sur les parties en rampe.

Dans ce qui suit, nous supposons, pour simplifier, que le ralentissement est limité dans tous les cas à 15 secondes et qu'on serre les freins plus ou moins énergiquement de façon à réaliser dans tous les cas le même effort retardateur (sauf sur les points où les rampes sont très fortes). Dans cette hypothèse, il est facile de calculer les modifications à faire subir au graphique de marche à vitesse moyenne pour tenir compte des arrêts. Supposons, par exemple, qu'il y en ait 3 par km., durant chacun 15 secondes, et que l'effort maximum soit limité à 700 kg. Les calculs correspondants sont résumés dans le tableau de

la page 627 et la courbe de vitesse ainsi obtenue pour la première partie du parcours est représentée au bas de la figure 867 (p. 626).

En portant les temps en ordonnées, on obtient les graphiques de marche rigoureux.

Mais ce procédé est très laborieux et inutile pour un tramway, étant donné

EXEMPLES D'ARRÊ[...]

	CONDITIONS DU PARCOURS				COEFFICIENT DE RÉSISTANCE en millièmes ou en kg. par tonne.					EFFORT RÉSISTANT TOTAL en kilo[...]
	LONGUEUR en kilomètres.	Inclinaison en rampe en m : m.	Rayon de courbure en mètres.	ACCÉLÉRATION MOYENNE en m : s : s.	Roulement.	Pesanteur.	Courbure.	Inertie.	total.	
	L	I	R	$A = \frac{V'_o}{t}$	$r = 10$	$i \times 1\,000$	$C = \frac{370}{R-10}$	102 A	f	F
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Exemple de ralentissement et de démarrage sur pente.	0,0188	+ 0,0210		— 0,2957	10	+ 21	+ mécanisme 6		+ 37	+ 40
	Arrêt.									
	0,0166	+ 0,0210		0,333	10	+ 21		34		80
Exemple de ralentissement et de démarrage sur rampe.	0,1158	— 0,01		— 0,1726	10	— 10	+ mécanisme 6		6	6
	Arrêt.									
	0,0166	— 0,01		0,333	10	— 10		34		45

le nombre très grand et constamment variable des arrêts. On doit se contenter pratiquement de représenter la vitesse moyenne qui correspond à la corde de la ligne brisée précédente. On tiendra compte seulement des changements importants d'allure. Par exemple, dans le cas de la figure 865 on passe en B, en sortant de la ville, d'une vitesse moyenne de 10,5 km : h. à une vitesse de 20 km : h. Le tableau de la page 628 indique comment sont calculées ces vitesses en tenant compte des arrêts et en admettant une accélération de

1,543 km : h : s. On adoptera donc, dans la figure 867, deux inclinaisons différentes pour la ligne représentant les temps en fonction des distances. La figure 867 donne le graphique simplifié de la ligne étudiée (p. 614) avec départs toutes les 10 minutes, et en supposant une voiture en stationnement à chaque terminus.

DE DÉMARRAGES

TESSE MOYENNE		PUISSANCE MÉCANIQUE DÉPENSÉE en watts.	RENDEMENT DES MOTEURS	PUISSANCE ÉLECTRIQUE AUX BORNES en watts.	TENSION DE DISTRIBUTION en volts.	COURANT MOYEN en ampères.	ÉNERGIE MOYENNE DÉPENSÉE en watts-heures.	OBSERVATIONS
En km. à l'heure.	En mètres par seconde.							
V	$V' = \frac{3,6}{V}$	$P = 9,81\,FV'$	η	$P' = \frac{P}{\eta}$	U	$\frac{P'}{U}$	$\frac{P'L}{V}$	
11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	
6	1,66							Ralentissement et arrêt sur 18,8 m.
								Arrêt en 11,27 s.
6	1,66	13 028	0,50	26 056	500	52	72,4	Départ en 10 s. Accélération sur 16,60 m. Effort moteur nécessaire : 11 (10 + 21) + 34 × 13,5 = 800 kg. Courant normal à la vitesse de 12 km : h., en supposant η = 0,70 : $I = \frac{9,81 \times 341 \times 1,666}{500 \times 0,70} = 15,64$ amp.
6	1,66							Ralentissement sur 115,8 m.
								Arrêt en 69,5 s.
6	1,66	7 504	0,50	15 008		30	41,7	Départ en 10 s. F = 11 (10 — 10) + 13,5 × 34 = 459 kg. Courant à vide I = 7 amp.

On peut enfin, en reportant sur cette même figure les valeurs du courant à chaque instant en abscisses, obtenir une courbe de courant en fonction du temps, comme dans l'exemple suivant ; mais pour les tramways on se contentera de relever la dépense d'énergie totale pour un parcours et d'en déduire la dépense par tonne-kilomètre, arrêts non compris, comme l'indiquent les tableaux des pages 618-619. On achèvera alors le calcul relatif à l'effet du démarrage et au choix des moteurs suivant les méthodes indiquées plus loin.

2° ***Projet de traction sur un métropolitain.*** — L'application des méthodes exposées au chapitre XIII se fait beaucoup plus complètement dans le cas des lignes de métropolitains et d'une manière

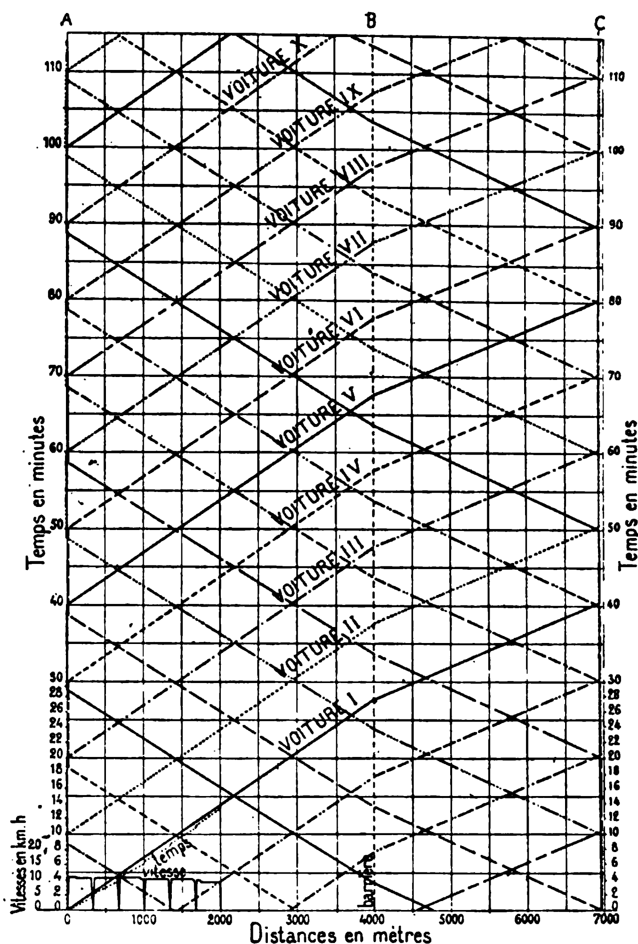


Fig. 867. — Exemple de graphique tenant compte des variations de vitesse des équipements à 2 moteurs réglés suivant la méthode série-parallèle. — Voiture de 11 t. à 2 moteurs parcourant la ligne dont le profil est donné par la figure 863 et les conditions de parcours par la figure 864.

générale des lignes de chemins de fer ayant des arrêts peu nombreux et fixes. Pour un métropolitain surtout l'horaire doit être fixé avec une grande précision. Nous prendrons comme exemple une ligne simple de 2 810 m. de longueur, avec 6 stations espa-

cées de 4 à 500 m., et desservie par des trains légers et nombreux analogues à ceux des « Elevated » américains.

Données. — Étant donnée une ligne de 2 810 m. de longueur totale, dont les éléments en profil et en plan sont pour simplifier indiqués sommairement

ALLURE	DÉCLIVITÉ en rampe en m : m.	RÉSISTANCE				EFFORT MOYEN A LA JANTE admis pendant le démarrage r = 700 kg.	EFFORT ACCÉLÉRATEUR F' = 700 − R.	ACCÉLÉRATION MOYENNE en km : h. par seconde.	VITESSE FINALE à atteindre.	TEMPS EMPLOYÉ en secondes.	VITESSE MOYENNE dans l'intervalle, en km : h.	DISTANCE PARCOURUE en mètres.
		de roulement.	de courbure.	de pesanteur. (pour 11 t.)	totale R							
Démarrage . . .	— 0,0126	110		— 138,6	— 28,6	700	728,6	1,901	12	6	6	10,64
Marche	—	—							—	30	12	99,36
	0,0134	—							11,3	65	11,3	204,5
Ralentissement .	—								0	10	5,65	18,5
Arrêt.										15		
Démarrage . . .	—	110		147	257	—	443	1,172	11,3	10	—	15,3
Marche	—								—	95	11,3	290,2
Ralentissement .	—								0	10	5,65	18,5
Arrêt.										15		
Démarrage . . .	—	—		—	—		—	—	11,3	10	—	15,3
Marche.	—								—	83	11,3	260,7
	0,021								10,5	15	10,5	43,6
Ralentissement .	—								0	10	5,25	14,6
Arrêt.										15		
Démarrage . . .	—	110		231	341	—	359	0,0389	10,5	11	—	16,34
Marche	—								—	104	10,5	302,6
Ralentissement .	—								0	10	5,25	14,6
Arrêt.										15		
Démarrage . . .	—	—		—	—		—	—	10,5	11	—	16,34
Marche.	—	—		—	—				—	96	10,5	290,66
	—	—	101,2	—	442,2				10	8	5	21
	0,0235	—	—	258,5	469,7				9,5	4	4,75	9,4
Ralentissement .	—								0	10	—	13,2
Arrêt.										15		
Démarrage . . .	—	—		—	368,5	—	331,5	0,8672	10	12	5	16
Marche.	—								—	17	10	48,37
	0,0459	—		504,9					8,5	106	8,5	231,2
Ralentissement .									0	10	4,25	11,8
Arrêt.										15		

au bas de la figure 870, on cherche les conditions de parcours aller et retour de trains légers destinés à réaliser une vitesse commerciale de 18 à 20 km : h. La vitesse maxima n'est pas fixée en palier; elle est limitée sur les courbes à 25, 35 et 45 km : h., suivant que le rayon est de 100, 150 ou 200 m.

CALCUL DE LA VITESSE COMMERCIALE EFFECTIVE

DÉSIGNATION DU PARCOURS	LONGUEUR DU PARCOURS en mètres.	DURÉE DE PARCOURS en secondes, sans tenir compte des arrêts ni des démarrages. $\Sigma \frac{l}{v}$	NOMBRE D'ARRÊTS	PERTE DE TEMPS aux arrêts en secondes.	DURÉE RÉELLE du trajet en secondes.	DURÉE DU TRAJET en minutes.		MOYENNE des vitesses effectives en km : h.	VITESSE COMMERCIALE en km : h.	OBSERVATIONS
En ville, aller.	4 016	1 385	12	281	1 666	27,8	Aller 40,4	10,5	8,68	DONNÉES : Nombre d'arrêts par km., 3 *sur tout le parcours.* *En ville* : durée du ralentissement jusqu'à l'arrêt, 10 s. ; durée de l'arrêt, 15 s. ; durée de démarrage moyenne (pour 10,5 km : h.), 6,8 s. ; d'où perte de temps à chaque arrêt. $15 + \frac{10 + 6.8}{2} = 23,4$ s. *En dehors de la ville* : Ralentissement, 20 s. ; arrêt, 15 s. ; démarrage moyen, 13 s. ; d'où perte de temps par arrêt, $15 + \frac{20 + 13}{2} = 31,5$ s.
Hors de la ville, aller.	2 930	490	8,5	267	758	12,6		20	13,9	
Hors de la ville, retour.	2 930	536	8,5	267	803	13,4	Retour 38,7	20	13,14	
En ville, retour . . .	4 016	1 236	12	281	1 517	25,3		10,5	9,53	
Parcours total, aller et retour.	13 892				4 744	79,1			10,54	

Effort résistant en palier, 11 t. × 10 kg : t. = 110 kg.
Effort accélérateur, 700 — 110 = 590 kg. ; accélération A = 1,543 km : h. par seconde.
Pour atteindre la vitesse 10,5 km : h., il faut donc 6,8 s.,
et pour — 20 — — 13,0 s.

La composition du train type est supposée la suivante :

1 automobile locomotrice	Caisse.	10 t.
	Bogies	10 —
	2 moteurs électriques . .	5,5 —
	Accessoires — . . .	1,5 —
	70 voyageurs	5 —
		32 t.
2 voitures à bogies de 16 t. avec 80 voyageurs = 2 × 22 ou 4 voitures ordinaires de 8 t. avec 40 voy. = 4 × 11		44 —
	Total.	76 t.

que nous arrondissons à 80 t.

Le calcul indique comme coefficient d'inertie 1,15, ce qui donne 92 t. pour le poids d'inertie, comprenant l'inertie des armatures et des roues.

On demande de réaliser un effort d'accélération au départ de 40 kg. par tonne de train, soit 3 200 kg. Le *poids adhérent* de la locomotrice, d'après ses

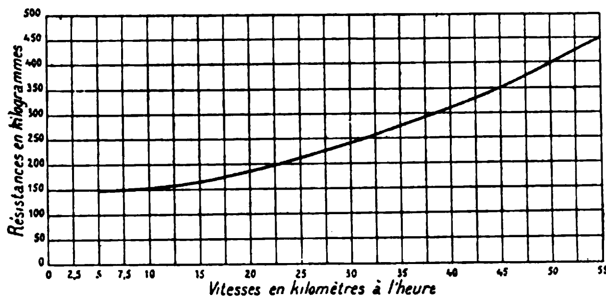


Fig. 868. — Résistance à la traction du train type de 80 tonnes.

données de construction, est de 18 t., ce qui permet de réaliser un effort de $\frac{18\,000}{5} = 3\,600$ kg., plus que suffisant (nous prenons le coefficient 1/5 parce qu'il s'agit d'un moteur à couple de rotation uniforme; on pourrait aller jusqu'à 1/4).

Les efforts de traction du matériel à bogies ont été calculés d'après les formules de la page 459, en prenant pour la locomotrice 1 kg. par tonne d'effort supplémentaire pour tenir compte du frottement additionnel dans les coussinets. On a admis 6,5 m² pour la surface de front de la première voiture et 2 m² pour les voitures suivantes, soit en tout 8,5 m². En déterminant ainsi le coefficient de traction total en palier à différentes vitesses, on a obtenu la courbe de la figure 868.

Il y a sur chaque parcours 4 arrêts intermédiaires, dont la durée est supposée de 30 secondes ; le temps perdu de ce chef sur chaque trajet est de 120 secondes, soit 1/30 d'heure.

Détermination de la vitesse maxima nécessaire entre stations. — Pour réali-

ser une vitesse commerciale de 20 km : h., il faut une vitesse moyenne entre stations $v_{moy.}$, donnée par la relation

$$v_{moy.} = \frac{2,810}{\frac{2.810}{20} - \frac{1}{30}} = 26,2 \text{ km : h.}$$

D'où la durée moyenne de parcours, 77 secondes. La formule de la page 553 donne pour valeurs correspondantes de la vitesse maxima

$$V = 40,8 \text{ km : h.}$$

et de l'accélération

$$A = 0,932 \text{ km : h : s.},$$

ce qui, en tenant compte de l'inertie des parties tournantes, demande un effort accélérateur

$$102\ A \times \frac{92}{3,6} = 2\,430 \text{ kg.}$$

En prenant 40 kg : t. d'effort moteur, nous avons un effort accélérateur

$$(40 - 4)80 = 2\,880 \text{ kg.}$$

plus que suffisant.

Quant à la vitesse maxima, nous la majorerons de 50 p. 100 environ, en admettant qu'elle atteigne 60 km : h. en palier, pour tenir compte de ce que l'accélération se fait suivant une ligne courbe au lieu d'une ligne droite et de ce que le ralentissement imposé par les courbes ne permet pas de dépasser 25 km : h. sur certains tronçons.

Cette majoration à 60 km : h. étant toute de sentiment et inspirée seulement par l'empirisme, l'exactitude ne pourra en être vérifiée que par un calcul a posteriori du parcours du train muni de moteurs définis.

Choix des moteurs. — La première question à résoudre maintenant est donc le choix des moteurs. Il convient pour simplifier l'équipement de n'employer que deux unités. Les deux conditions à réaliser, par suite, pour les moteurs sont les suivantes :

1° Chacun d'eux doit pouvoir supporter un effort maximum au démarrage de 1 600 kg ;

2° Mis en parallèle, les deux moteurs doivent pouvoir atteindre la vitesse maxima entre stations adoptée ci-dessus, c'est-à-dire 60 km : h. ; l'effort résistant du train à cette vitesse étant, d'après la courbe, de 320 kg., qu'on arrondira à 400 kg., chaque moteur doit développer à cette vitesse environ 200 kg.

On doit chercher autant que possible à employer des types de moteurs existants et ne recourir au calcul d'un type spécial, toujours coûteux à réaliser, que si les données sortent des conditions ordinaires. Ce n'est pas le cas ici.

En effet, en prenant le catalogue d'un constructeur, par exemple celui de la Compagnie Walker, nous trouvons deux types de moteurs paraissant répondre sensiblement à ces desiderata : celui dit de 125 chev. et celui dit de 200 chev. L'expérience américaine indique que le premier doit être un peu trop faible, mais cela ne ressort pas de l'examen des courbes, et il y a lieu par conséquent de procéder à une comparaison complète entre les deux types, comparaison qui montrera en même temps s'il y a lieu de modifier l'enroule-

ment de l'induit ou la réduction des engrenages de l'un ou de l'autre pour l'adapter plus complètement aux besoins.

Calcul des vitesses et des temps de parcours. — Pour comparer ces deux types de moteurs, nous faisons d'abord pour chacun l'étude d'un trajet aller, suivant la méthode indiquée précédemment (p. 561), en tenant compte des effets de l'inertie en chaque point du parcours. Le calcul est laborieux, mais ne présente aucune difficulté. Le tableau ci-après en donne un exemple pour le tronçon BC ; les autres tronçons sont calculés de même et nous croyons inutile de donner les tableaux correspondants, les résultats étant suffisamment indiqués par les graphiques des figures 870 et 871.

CONDITIONS DE PARCOURS SUR UN TRONÇON BC.

DÉSIGNATION DU TRONÇON	VITESSE en kilomètres à l'heure.	DIFFÉRENCES SUCCESSIVES Δ v	COUPLAGE DES MOTEURS	COURANT TOTAL pris à la ligne.		EFFORT MOTEUR à la jante.	EFFORT résistant dû			EFFORT ACCÉLÉRATEUR résultant.	ACCROISSEMENT DE VITESSE en km : h. par seconde.	TEMPS EMPLOYÉ pour passer d'une vitesse à la suivante.	ÉPOQUE en secondes.	DISTANCE parcourue en mètres.	
				Valeur effective.	Valeur moyenne.		à la pesanteur.	à la courbe.	au coefficient de traction et à l'air.					Parcours partiels.	Parcours cumulés.
BC	0		Série	300											
		14,35			300	3 230	— 800		150	3 880	1,480	9,6		19,42	
	14,35		Série Parallèle	300 / 600									9,6		19,42
		8,42			600	3 230	— 800		180	3 850	1,477	5,7		23,34	
	22,77			600									15,3		42,76
		5,93			600	3 230	— 800		218	3 812	1,463	4,1		29,17	
	28,7			600									19,4		71,93
		2,3			540	2 830	— 800		242	3 388	1,3005	1,8		14.66	
	31			480									21,2		86,59
		2			445	2 208	— 800		256	2 752	1,036	1,9		16,83	
	33			410									23,1		103,42
		2			381,5	1 790	— 800		269	2 321	0,891	2,2		21,01	
	35			353									25,3		124,43
		1		courant interrompu			— 800		280	520	0,1996	5,0		49,4	
	36			330									30,3		173,83
		— 11		application du frein							— 3,6	3.0		25,84	
	25			284	courant maintenu								33,3		199,67
	Vitesse maintenue constante	0			284	1 193	380	600	213	0	0	28,8		200	
	25			284 / 600									62,1		399,67
		3,7			600	3 230	380		224	2 626	1,008	3,7		27,38	
	28,7			600									65,8		427,05
		2,3			540	2 830	380		242	2 208	0,8476	2,7		22,5	
	31			480									68,5		449,55
		2			445	2 208	380		256	1 572	0,6034	3,3		29.46	
	33			410									71,8		479,01
		2			381,5	1 790	380		269	1 141	0,438	4,6		43,13	
	35			353									76,4		522,14
		2			331,5	1 470	380		283	807	0,3098	6,5		64,56	
	37			310									84,9		586,7

Ces graphiques sont construits d'abord en fonction des distances, en portant les parcours en abscisses et les vitesses en ordonnées ; on a ainsi une base invariable qui facilite beaucoup les comparaisons et permet en particulier les modifications des courbes de vitesse sans changement des abscisses.

En partant de chaque station, la vitesse du train s'accroît suivant une courbe V dont la forme dépend des résistances de la voie.

Les mises en vitesse ont été déterminées dans l'hypothèse simplifiée de l'accélération constante au début (voir p. 532). Mais au lieu d'une première partie rectiligne, chaque courbe de démarrage, étant rapportée aux distances, présente une partie courbe. On a en effet, en appelant v la vitesse variable, t le temps, A l'accélération constante, x l'abscisse,

$$dv = \mathrm{A}dt = \frac{\mathrm{A}}{v}\,dx,$$

d'où

$$v^2 = 2\mathrm{A}x,$$

Un peu avant d'arriver à la station suivante, on interrompt le courant et on serre les freins à air comprimé.

Nous avons admis comme plus haut (p. 554) que le freinage obtenu correspondait à un effort retardateur de 100 kg : t., donnant une retardation constante d'environ 1 mètre par seconde. La courbe des vitesses en fonction des distances parcourues pendant le freinage est ainsi une parabole ayant pour axe l'axe des abscisses et pour sommet le point d'arrêt ; son équation est, en appelant x_0 l'abscisse de ce point,

$$v^2 = 2\mathrm{A}\,(x_0 - x).$$

Sur la même épure on porte également en ordonnées les temps calculés à chaque instant d'après la vitesse moyenne entre deux points voisins, par la relation

$$t = \frac{x - x'}{v_{\text{moy.}}}.$$

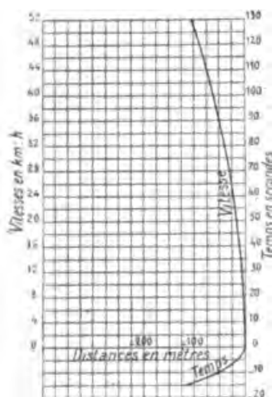


Fig. 869. — Courbes de vitesse et de temps en fonction du parcours pendant le freinage.

Pendant les périodes d'accélération constante ou de retardation constante, la courbe de t est aussi une parabole, ayant pour axe l'axe des abscisses, en vertu de la relation

$$x = \frac{\mathrm{A}t^2}{2}.$$

La figure 869 représente à part les deux courbes de temps et de vitesse pendant le freinage en fonction du parcours.

A chaque station, on reproduit la seconde courbe (vitesse) ; son intersection avec la courbe de mise en vitesse tracée à partir de la station précédente indique le moment où il faut appliquer les freins. La courbe V de vitesse pendant le parcours entre deux stations est ainsi déterminée, et l'on peut tracer ensuite la courbe correspondante des temps T d'après les données du tableau,

en ajoutant à la fin un tronçon de la courbe de la figure 869 au moyen d'un gabarit.

Les figures 870 et 871 représentent les courbes de parcours à l'aller ainsi

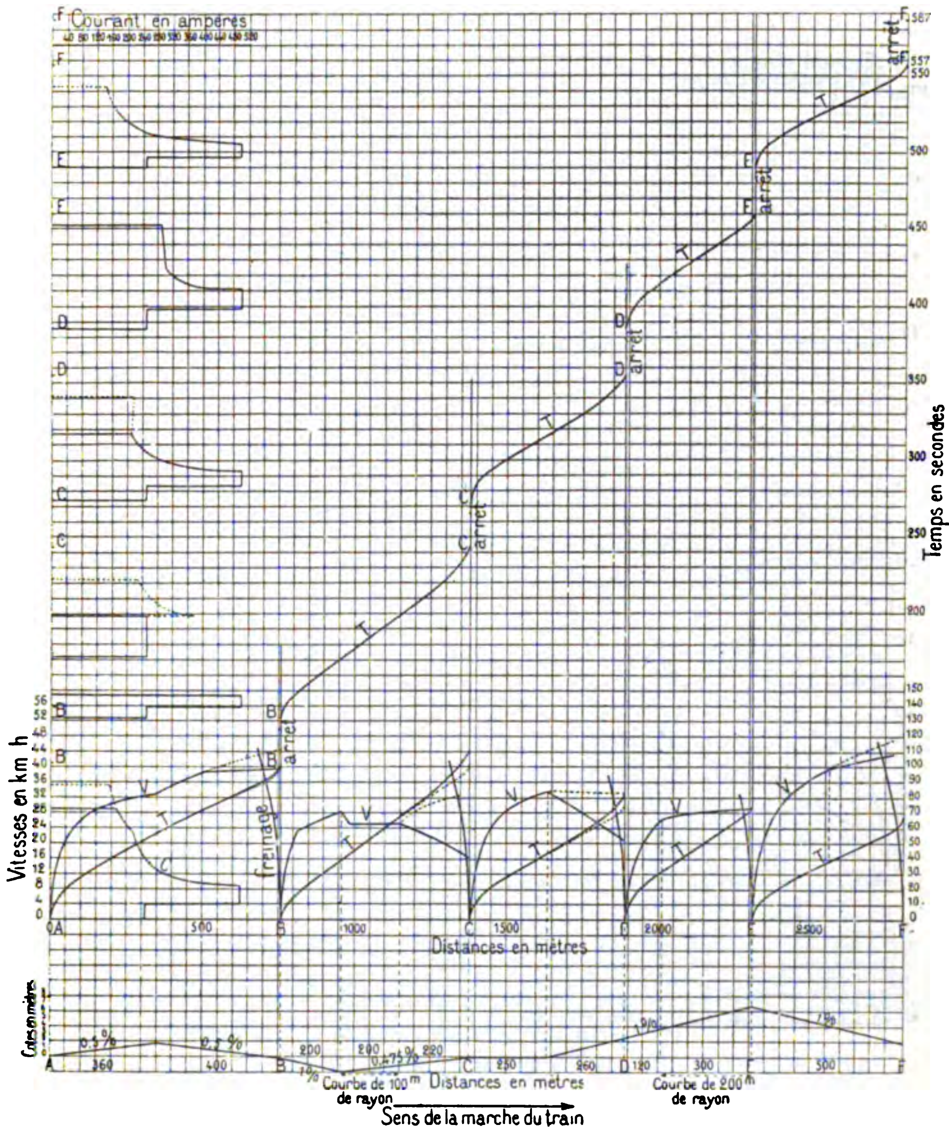


Fig. 870. — Traction du train de 80 tonnes avec 2 moteurs de 125 chevaux. Graphique des vitesses, des temps et des courants (parcours d'aller).

obtenues respectivement avec les deux équipements définis ci-dessus. Ces courbes sont déterminées en supposant les moteurs travaillant constamment

et sans shunt sur les inducteurs. La possibilité de shunter ceux-ci offre une marge suffisante pour accroître la vitesse en cas de retard, à moins qu'on ne préfère plus simplement réduire dans ce cas la durée des arrêts, pour lesquels 20 secondes suffisent d'après la pratique américaine.

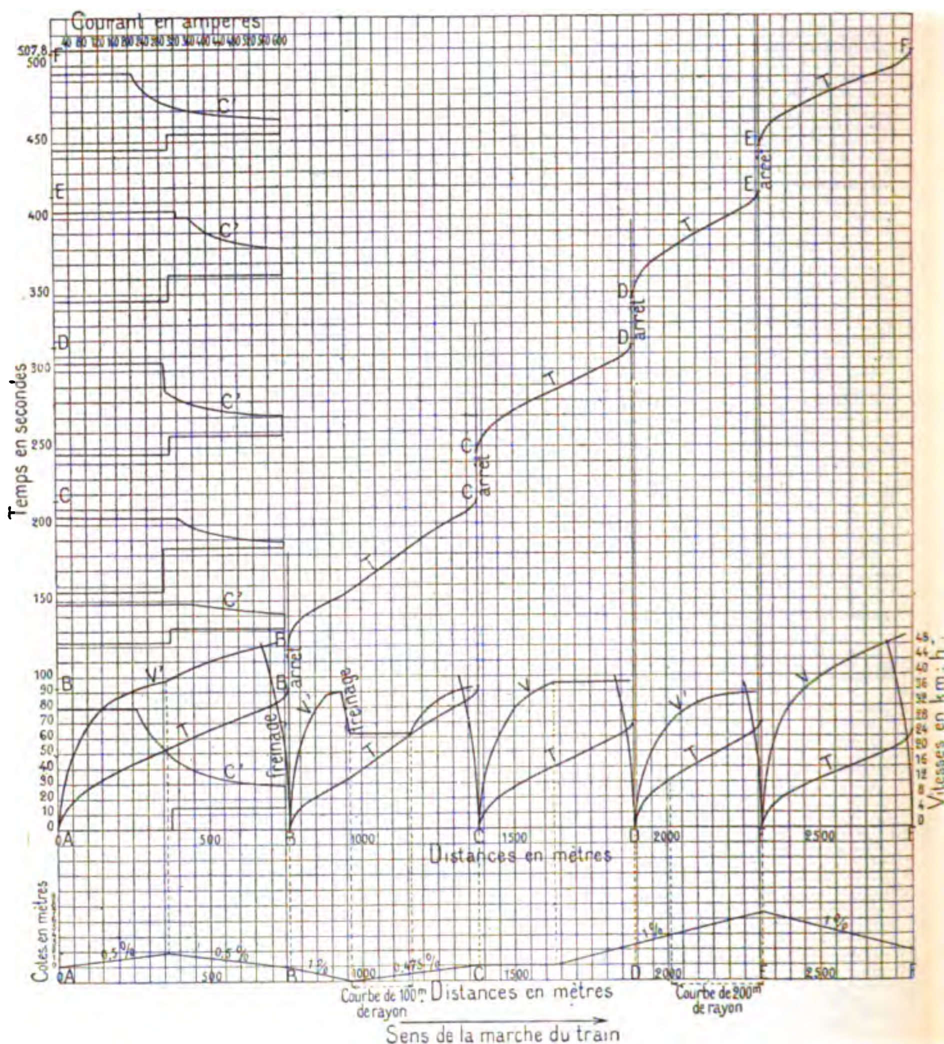


Fig. 871. — Traction du même train avec 2 moteurs de 200 chevaux. — Graphique des vitesses, des temps et des courants (parcours d'aller).

Au lieu d'opérer ainsi, on peut encore se réserver l'élasticité nécessaire sans empiéter sur les arrêts en s'imposant de rompre le courant sur chaque tronçon à une distance fixe en avant de la station, à 250 m. par exemple. Pour comparer

ces deux méthodes, nous en avons fait l'application concurremment sur la figure 870 relative aux moteurs de 125 chevaux.

Les phases du parcours sont les suivantes :

Parcours AB. — Effort accélérateur maximum, 2 700 kg.

A la 56,5e seconde, passage d'une rampe sur une pente; à partir de ce point, croissance plus rapide de la vitesse, tandis que la courbe des temps s'élève moins vite (changement imperceptible sur l'épure) ; au même moment, la courbe de courant s'infléchit et le courant diminue plus vite en fonction du temps.

Pour les 250 derniers mètres de ce parcours on a tracé deux courbes de temps et de vitesse; les unes, en pointillé, correspondent au cas où le courant est maintenu jusqu'au moment du freinage; les autres, en traits pleins, correspondent à la marche en dérive quand on interrompt le courant à partir de ce point.

Parcours BC. — Démarrage rapide sur une pente de 1 p. 100; effort maximum, 3 906 kg.

16 secondes après le départ, la vitesse atteint 23,3 km : h.; à ce moment on coupe le courant; la vitesse continue cependant à croître lentement sous l'action de la pesanteur jusqu'à la valeur de 28,4 km : h., qu'elle atteint à l'entrée d'une courbe de 100 m. de rayon sur rampe de 0,475 p. 100. Elle baisse alors rapidement jusqu'à 25 km : h.; à ce moment, on rétablit le courant et on maintient la vitesse constante à l'aide du régulateur jusqu'à la sortie de la courbe ; la portion correspondante de la courbe des temps est droite et l'effort résistant correspond à un courant de 250 amp., représenté constant sur l'épure. A partir de la sortie de la courbe, on a tracé deux séries de diagrammes : les uns en pointillé correspondent au cas où l'on maintient le courant; les autres en traits pleins correspondent à la marche sans courant; dans ce cas, il se produit une rapide diminution de vitesse, très légèrement atténuée par la décroissance de la résistance de l'air, tandis que la courbe des temps se relève et tourne sa convexité vers les abscisses.

Parcours CD. — Démarrage en palier; effort accélérateur maximum, 3 106 kg.

43 secondes après le départ, passage sur une rampe de 1 p. 100. A partir de ce point, les courbes en pointillé correspondent au cas où l'on maintient le courant, celles en traits pleins au cas de la mise hors circuit des moteurs.

Parcours DE. — Démarrage lent sur rampe de 1 p. 100; effort accélérateur maximum, 2 300 kg.

31 secondes après le départ, entrée dans une courbe de 200 m. sur la même rampe; mais les deux courbes de l'épure continuent à s'élever et conservent leur convexité tournée vers les ordonnées. Impossible de couper le courant à 250 m. avant la station E : le train s'arrêterait avant la station.

Parcours EF. — Démarrage rapide sur pente de 1 p. 100; effort maximum, 3 906 kg.

38 secondes après le départ, on trace deux séries de courbes, les unes en pointillé correspondant au maintien du courant, les autres en traits pleins correspondant à sa suppression.

Les figures 871 et 872 représentent des phases analogues, qui s'expliquent suffisamment d'elles-mêmes pour nous dispenser de les décrire.

En faisant la somme des durées des parcours partiels sous forme d'un graphique de marche complet (tracé en diagonale sur les figures), on obtient pour les deux équipements les durées totales de parcours.

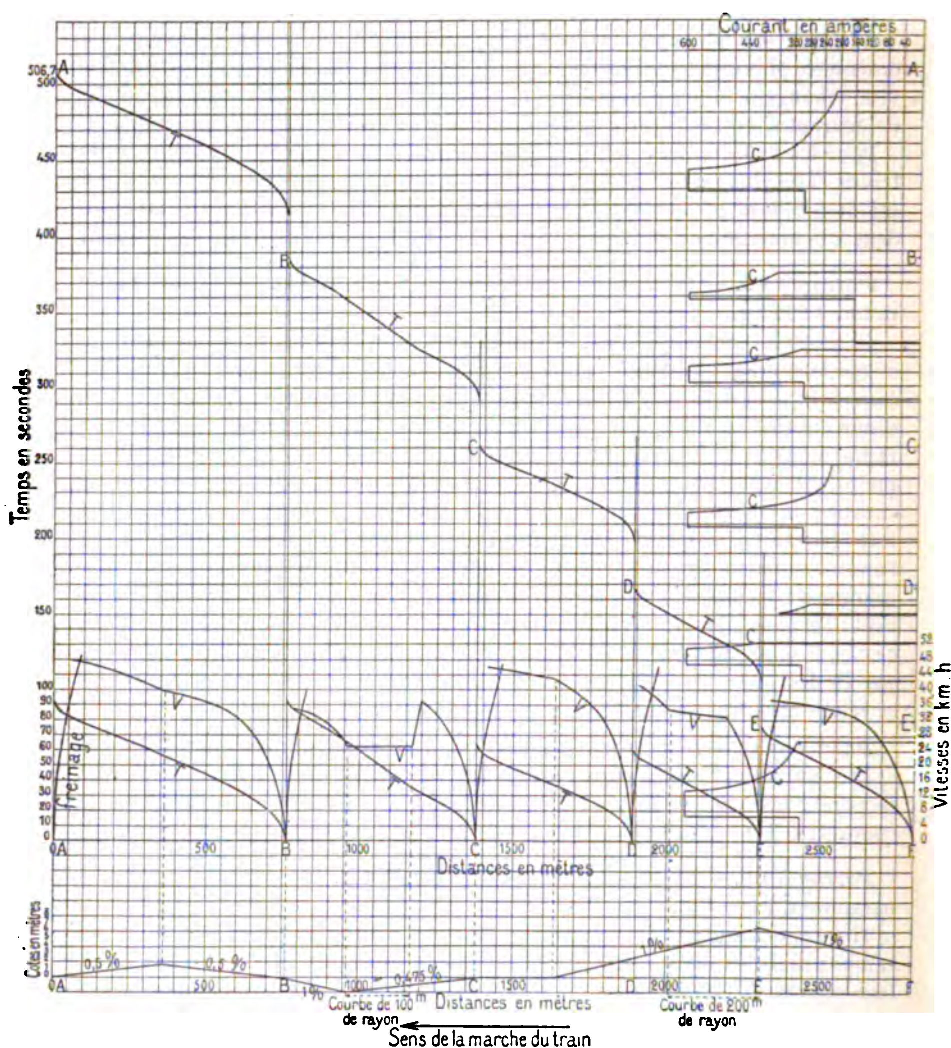


Fig. 872. — Traction du même train avec 2 moteurs de 200 chevaux. — Graphique des vitesses, des temps et des courants (parcours de retour).

Le tableau ci-contre, qui s'en déduit, résume en même temps la comparaison des durées de parcours correspondant aux deux vitesses commerciales de 20 et 18 km : h. On voit ainsi que l'équipement à 2 moteurs de 125 chevaux ne peut guère permettre de dépasser sûrement la vitesse com-

DURÉE DU PARCOURS

ÉQUIPEMENT EMPLOYÉ	COURANT MAXIMUM AU DÉMARRAGE en ampères.	NOMBRE D'ARRÊTS	TRAJET ALLER (2810 m.)																			
			DURÉE THÉORIQUE correspondant à la vitesse commerciale de						DURÉE RÉELLE DU PARCOURS													
			20 km : h.			18 km : h.			En coupant le courant au moment du freinage.							En coupant le courant à 230 mètres avant la station.						
			Arrêts compris, en secondes.	Arrêts non compris, en secondes.	Vitesse moyenne entre arrêts en km : h.	Arrêts compris, en secondes.	Arrêts non compris, en secondes.	Vitesse moyenne entre arrêts en km : h.	Arrêts compris, en secondes.	Arrêts non compris, en secondes.	Durée de consommation.	Marge de temps en secondes relativement à une vitesse commerciale de 18 km : h.	Marge de temps en secondes relativement à une vitesse commerciale de 20 km : h.	Vitesse moyenne entre arrêts en km : h.	Arrêts compris, en secondes.	Arrêts non compris, en secondes.	Durée de consommation.	Marge de temps en secondes relativement à une vitesse commerciale de 18 km : h.	Marge de temps en secondes relativement à une vitesse commerciale de 20 km : h.	Vitesse moyenne entre arrêts en km : h.
2 moteurs de 125 chevaux.	500	4	505,8	385,8	26,2	562	442	22,9	533	413,4	340,4	+ 28,6	— 27,6	24,47	556,7	463,7		+ 5,3	— 50,9	23,16
2 moteurs de 200 chevaux.	600	4	505,8	385,8	26,2	562	442	22,9	507,7	387,7	325,6	+ 54,3	— 1,9	26,09						

CALCUL DES CONSOMMATIONS ET DU RENDEMENT

GRAPHIQUE CONSIDÉRÉ	PARCOURS	Aire de la courbe de courant en ampères-secondes $\Sigma I \times t$	Durée de consommation du courant en secondes Σt	Courant moyen correspondant $I_m = \frac{\Sigma I \times t}{\Sigma t}$	Énergie prise à la ligne en watts-heures $W = \frac{(\Sigma I \times t) \times U}{3\,600}$	Puissance moyenne correspondante en kilowatts $P = \frac{I_m \times U}{1\,000}$	Travail mécanique transmis par les moteurs à la jante en watts-heures $T = \frac{(\Sigma t \times l) \times 9{,}81}{3\,600}$	Puissance mécanique transmise à la jante en kilow. $P' = \frac{T \times 3{,}6}{\Sigma t}$	Rendement des moteurs (engrenages compris) $\tau = \frac{P'}{P}$	Consommation d'énergie en watts-heures par tonne-km.
Graphique I (fig. 870). Traits pleins. 2 moteurs de 125 chevaux, *courant coupé* à 250 m. avant la station.	AB	20 450	72	283	2 841	141	1 976	98	0,69	»
	BC	12 280	42	291	1 706	146	1 051	91	0,62	»
	CD	13 660	42	323	1 896	161	1 264	135	0,67	»
	DE	22 520	67	338	3 128	169	2 029	110	0,65	»
	EF	11 210	38	293	1 556	146	1 122	106	0,73	»
Moyennes : 1° Pendant la consommation.	AF	»	261	307	11 127	154	7 442	103	0,67	49,5
2° Pendant le temps de marche.	AF	»	437	183	11 127	92	»	»	»	»
3° Pendant la durée totale.	AF	»	557	142	11 127	71	»	»	»	»
Même graphique I Traits pointillés. 2 moteurs de 125 chevaux, *courant maintenu* jusqu'au freinage.	AB	23 060	88	263	3 203	131	2 329	96	0,73	»
	BC	18 710	67	279	2 598	140	1 760	94	0,68	»
	CD	19 060	67	286	2 644	143	1 858	100	0,70	»
	DE	22 520	66	320	3 128	169	2 029	110	0,65	»
	EF	13 530	52	257	1 879	129	1 404	96	0,75	»
Moyennes : 1° Pendant la consommation.	AF	»	340	284	13 452	142	9 380	99	0,70	59,8
2° Pendant le temps de marche.	AF	»	413	234	13 452	117	»	»	»	»
3° Pendant la durée totale du parcours.	AF	»	513	181	13 452	91	»	»	»	»
Graphique II (fig. 871). *Aller* 2 moteurs de 200 chevaux, *courant maintenu* jusqu'au freinage.	AB	25 380	79	320	3 526	160	2 874	130	0,81	»
	BC	27 520	78	355	3 822	177	2 585	120	0,68	»
	CD	22 740	59	382	3 159	191	2 108	134	0,70	»
	DE	25 940	59	436	3 602	218	2 312	140	0,64	»
	EF	16 620	50	335	2 309	167	1 853	134	0,80	»
Moyennes : 1° Pendant la consommation.	AF	»	325	363	16 418	181	11 832	131	0,72	73
2° Pendant le temps de marche.	AF	»	388	305	16 418	152	»	»	»	»
3° Pendant le temps total.	AF	»	508	233	16 418	116	»	»	»	»
Graphique III (fig. 872). *Retour* 2 moteurs de 200 chevaux.	FE	27 510	66	»	3 822	»	2 680	»	0,70	»
	ED	13 330	31	»	1 852	»	1 204	»	0,65	»
	DC	18 120	51	»	2 518	»	1 910	»	»	»
	CB	25 090	79	»	3 603	»	2 527	»	»	»
	BA	28 430	79	»	3 945	»	2 891	»	»	»
Moyennes : 1° Pendant la consommation.	FA	»	306	370	15 740	185	11 212	132	0,71	70
2° Pendant le temps de marche.	FA	»	387	»	»	»	»	»	»	»
3° Pendant la durée totale du parcours.	FA	»	507	»	»	»	»	»	»	»

merciale de 18 km : h., tandis que les 2 moteurs de 200 chevaux donnent sensiblement 20 km : h., avec l'élasticité supplémentaire résultant, comme on l'a vu plus haut, du shuntage et de la réduction éventuelle des arrêts.

C'est donc ce dernier équipement que nous choisirons.

Pour achever la comparaison, il faut remarquer que la dépense d'énergie par train-kilomètre sera naturellement plus forte avec cet équipement qu'avec celui de faible puissance; nous allons calculer les chiffres correspondants.

Calcul des consommations d'énergie. — A chaque valeur de la vitesse correspond un courant donné par les caractéristiques des moteurs et que nous avons inscrit dans les tableaux tels que celui de la page 631. En portant ces valeurs en abscisses le long de l'axe des temps, on obtient sur le côté gauche de chaque figure 870, 871 et 872 la courbe des consommations de courant en fonction du temps. Cette courbe nous servira plus loin à étudier la variation du courant total demandé simultanément par les trains à la ligne ou à l'usine génératrice. Elle nous permet dès maintenant de calculer pour chaque train l'énergie totale consommée, le courant moyen pendant le parcours et le courant moyen pendant la consommation. Il suffit à cet effet de planimétrer les courbes de courant. Le tableau de la page 638 résume les résultats obtenus : sur le parcours aller, l'équipement faible donne des dépenses spécifiques de 49,5 et 59,8 watts-heures par tonne-km., suivant qu'on interrompt ou non le courant avant de freiner, tandis que l'équipement fort donne une dépense de 73 watts-heures, avec 70 w.-h. pour le parcours de retour; cette différence de dépense tient surtout à une différence de perte pendant le freinage, car le rendement du second équipement est meilleur que celui du premier : 0,71 et 0,72, au lieu de 0,67 à 0,70.

On remarquera combien on accroît la dépense pour augmenter faiblement la vitesse commerciale en passant du petit équipement au grand. Ce dernier est cependant à préférer par suite de la plus grande élasticité de régime qu'il permet. Le courant moyen pendant la consommation atteint en effet dans les petits moteurs un régime de $\frac{284}{2}$ ampères, qui est presque exagéré pour eux, tandis que pour les gros moteurs le régime de $\frac{363}{2}$ ampères est très acceptable. Si l'on voulait se réserver éventuellement l'addition de voitures supplémentaires, il conviendrait de renforcer encore l'équipement, mais ce serait au détriment du rendement journalier des trains légers ordinaires.

II. — Calcul abrégé approximatif applicable aux tramways

Les tramways urbains à réseau très étendu et fréquenté exigent une très grande élasticité de service, car on est appelé à voir d'une heure à l'autre le trafic varier dans des proportions considérables ; en outre, l'arrêt simultané de plusieurs voitures dans des rues encombrées et leur démarrage subséquent donnent souvent lieu à de violents à-coups dans la consommation du courant. Il n'y a donc

pas grand intérêt à connaître d'une manière détaillée, comme pour une ligne isolée ou un métropolitain, la variation de la puissance consommée le long de chaque parcours, et l'on peut, suivant en cela l'exemple de la majorité des industriels, qui aiment à s'affranchir de calculs laborieux, se contenter d'une approximation empirique telle que la suivante.

On évalue d'abord le courant moyen, qu'on déduit de l'énergie totale consommée par chaque voiture sur un parcours complet; puis on détermine le courant maximum nécessaire au point le plus défavorable de ce parcours pour choisir le moteur en conséquence. Nous allons expliquer successivement ces deux calculs.

Énergie électrique consommée sur une ligne. — On évalue ordinairement l'énergie électrique correspondant au travail mécanique total effectué sur chaque ligne du réseau en divisant celui-ci par le rendement η attribué aux moteurs

$$W = \frac{1}{\eta} T.$$

Ce procédé est admissible à condition qu'on applique le rendement *moyen* des moteurs en service courant, toutes pertes comprises, sur l'ensemble du parcours, et non le rendement maximum des moteurs seuls, comme le font volontiers certains constructeurs qui posent trop généralement $\eta = 0,85$ ou $0,90$. En tenant compte du démarrage, la pratique montre, comme on le verra au § 3, que le rendement moyen pour le moteur et ses engrenages ne dépasse guère 0,60 à 0,65, suivant le type de moteurs ; il est, du reste, assez mal déterminé.

Ce procédé a l'inconvénient de ne pas tenir compte de la variation du rendement moyen avec les conditions de fonctionnement. Nous opérerons donc d'une manière plus rationnelle en écrivant séparément :

La dépense relative à la traction en palier supposée appliquée à tout le parcours ;

La dépense supplémentaire sur les courbes et sur les rampes dépassant la déclivité limite i au delà de laquelle il n'y a plus compensation aux descentes ;

Enfin la dépense supplémentaire provenant des démarrages.

On obtient ainsi pour expression de l'énergie électrique

$$W = (P + Q)\left[\frac{1}{\eta} i'\Sigma l + \frac{1}{\eta'} \Sigma_{i-i'}\, l\,(i - i') + \frac{1}{\eta''}\frac{nV^2}{2g}\right],$$

η, η', η'' étant des valeurs différentes du rendement et n le nombre de démarrages prévu.

Pour les coefficients η, η' et η'' nous prendrons des valeurs déduites d'expériences ou plutôt nous emploierons directement les valeurs empiriques des consommations d'énergie déduites des essais connus et des statistiques d'exploitation.

Ces consommations, dont nous allons nous occuper dans les paragraphes suivants, seront exprimées en watts-heures comme toutes les consommations électriques ; il serait peu rationnel de faire intervenir ici des chevaux-heures[1], puisque les résultats d'expérience sont obtenus directement en watts, et que c'est aussi sous cette forme qu'on devra calculer la puissance des génératrices ; le cheval électrique est d'ailleurs une unité complètement démodée aujourd'hui.

Consommation spécifique sur lignes à faibles rampes. — Les critiques que nous avons formulées plus haut sur la considération d'un coefficient de traction global ne s'appliquent pas à la détermination de ces consommations pratiques considérées comme des valeurs *moyennes empiriques* utilisables comme renseignements de contrôle au même titre que tous les résultats déduits de statistiques en général. Mais il faut remarquer que ces données empiriques ne sont vraiment utiles que si elles ont été relevées sur une ligne dont les pentes ne dépassent pas la limite définie ci-dessus, car c'est seulement dans ce cas que l'influence des déclivités dans un parcours aller et retour disparaît.

La dépense d'énergie pour la traction devra toujours être rapportée à la voiture-kilomètre (en indiquant le poids) ou mieux encore à la *tonne-kilomètre*, qui est l'unité naturelle des transports ; indiquer, comme on le fait souvent, la puissance en chevaux électriques ou en watts consommée par une voiture sans en spécifier la

[1] Un cheval-heure électrique est égal, comme on le sait, à 736 watts-heures.

vitesse ni le poids ne signifie absolument rien, car cette puissance est égale au produit de l'effort par la vitesse et varie par conséquent avec chacun de ces facteurs.

On doit donc toujours diviser la puissance par la vitesse et le poids ; on obtient ainsi un nombre de watts par km : h. et par tonne ou, ce qui revient au même, de watts-heures par tonne-kilomètre.

Nous appellerons ce rapport la *consommation spécifique* d'un matériel électrique en palier. Comme il varie notablement avec le matériel employé et la nature des voies, nous en donnerons au § 4 des valeurs séparément pour chaque application. Nous remarquerons seulement ici qu'avec le rendement moyen de 0,73 on trouverait les dépenses suivantes par tonne-kilomètre :

Avec un coefficient	de traction	de	6 kg : t.,	W = 22,5	w.-h.
—	—	—	8	—	W = 30	—
—	—	—	12	—	W = 45	—

Ces chiffres sont des minima pour un projet de tramway.

Consommation d'énergie supplémentaire sur les rampes et les courbes. — La dépense d'énergie non compensée sur les fortes rampes correspond toujours à une marche des moteurs à pleine charge ou en surcharge; on est donc sûr que le rendement η_1'' varie entre 0,75 et 0,85 pour les moteurs modernes; on pourra admettre 0,75 sur les tramways et 0,80 sur les chemins de fer, engrenages compris.

Les courbes seront remplacées dans le calcul par des rampes équivalentes, comme on l'a déjà vu plus haut (p. 620).

Consommation d'énergie supplémentaire pour les démarrages. — L'énergie mécanique nécessaire pour amener une voiture de poids P en kg. à la vitesse V en mètres par seconde, à partir du repos, est, comme on le sait,

$$\frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2.$$

L'énergie électrique correspondante aux bornes du moteur, en appelant comme plus haut η_1'' le rendement de celui-ci, sera en joules ou watts-secondes

$$W = \frac{1}{\eta_1''}\, g\, \frac{P}{2g} V^2 = \frac{1}{2\eta_1''} PV^2$$

ou, si l'on mesure l'énergie en watts-heures, la vitesse en kilomètres à l'heure et le poids en tonnes,

$$W = \frac{1}{2\eta_1''} \frac{1000\,P\left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{3\,600} = \frac{1}{2\eta_1''} \frac{PV^2}{46,65} = KPV^2,$$

en appelant K l'énergie nécessaire en watts-heures par tonne et par km : h. de vitesse,

$$K = \frac{1}{93\,\eta_1''} \text{ en chiffres ronds.}$$

Le rendement η_1'' des moteurs pendant le démarrage dépend dans une large mesure des propriétés de ces moteurs, de la vitesse V réalisée et de l'habileté du mécanicien ; d'après diverses expériences, il semble atteindre 0,50 pour les moteurs de tramways et 0,60 pour les moteurs de chemins de fer, régulation comprise. En remarquant que, sur l'effort au démarrage, 0,20 à 0,25 environ est employé à vaincre l'effort de traction et déjà compté par conséquent plus haut avec le rendement de 0,75, on peut estimer à 0,30 ou 0,40 sur un tramway et à 0,50 ou 0,55 sur un métropolitain le rendement η'' applicable à la partie de l'énergie dépensée pour vaincre l'inertie. On en déduit pour valeur pratique de la constante K pour les tramways, 1/30 à 1/40 environ.

Ces chiffres sont conformes aux résultats d'expérience. Par exemple, pour amener à la vitesse de 16 km : h. une voiture de 30 places pesant 7 t. avec les voyageurs, la dépense d'énergie serait, d'après notre formule,

$$\frac{7 \times 256}{30} = 60 \text{ w.-h.}$$

Or, d'après des mesures de M. Knox, on dépenserait 61,5 à 80 w.-h. à la vitesse de 16 km : h. sur des voitures de 7 à 8 t. De même, des essais de M. Hering sur une voiture de 8,5 t. avec moteurs médiocres, amenée à la vitesse de 16 km : h., ont indiqué une dépense moyenne de 85 w.-h., qui correspond à une constante

$$\frac{85}{(16)^2 \times 8,5} = \frac{1}{25,6}.$$

La dépense effective varie entre 75 et 100 w.-h., suivant la décli-

vité et l'état de la voie. Il ne faut pas oublier non plus que la maladresse plus ou moins grande du mécanicien donne à cette dépense une valeur forcément supérieure à la valeur théorique.

Il nous paraît donc prudent, d'après ce qui précède, de compter pour chaque démarrage sur une dépense supplémentaire en watts-heures égale à $\frac{PV^2}{30}$, P étant le poids en tonnes et V la vitesse en kilomètres à l'heure. Cela donne environ 5 w.-h. par tonne à 12 km : h. et 9 w.-h. à 16 km : h., ces pertes pouvant être un peu réduites par la dérive entre arrêts (p. 617).

Dans les conditions ordinaires d'un service urbain, on peut tenir suffisamment compte des démarrages en arrondissant à 70 ou 80 w.-h. la dépense spécifique moyenne par tonne kilométrique. Ces chiffres sont même exagérés sur les réseaux européens, où les vitesses sont plus faibles ; on peut considérer dans ce cas qu'ils s'appliquent à la dépense d'énergie à l'usine, perte dans le réseau comprise, et que sur la voiture la dépense est seulement de 60 à 70 w.-h. Ces valeurs sont environ doubles de celles qu'indiquerait le calcul de la dépense moyenne en palier.

Calcul du courant moyen. — Connaissant le nombre de watts-heures moyens consommés par tonne kilométrique, on en déduit aisément le courant moyen nécessaire à une voiture donnée quelconque. On détermine le poids de celle-ci et sa charge moyenne probable (y compris la charge remorquée), en comptant 70 kg. par voyageur. Soient P le poids total en tonnes, W la consommation d'énergie par tonne-kilomètre, V la vitesse moyenne choisie en kilomètres à l'heure ; l'énergie nécessaire par kilomètre-voiture sera WP watts-heures et la puissance correspondante

$$WPV \text{ watts.}$$

U étant le voltage de distribution, le courant moyen est

$$I = \frac{WPV}{U}.$$

Par exemple, dans une distribution ordinaire à 500 volts, avec le chiffre large de consommation moyenne de 80 w.-h. indiqué

plus haut, une voiture de 12 t., charge comprise, consomme à la vitesse moyenne de 12 km : h. un courant moyen

$$I = \frac{80 \times 12 \times 12}{500} = 23{,}04 \text{ amp.},$$

soit 23 amp. en nombre rond. C'est le chiffre à adopter en Europe pour les voitures à impériale par exemple. En Amérique, où la vitesse atteint une moyenne de 16 km : h. dans les villes, on aurait dans les mêmes conditions plus de 30 amp.

En appliquant le même calcul à divers types de voitures et supposant encore la vitesse égale à 12 km : h. en moyenne, on obtient les chiffres pratiques suivants (soit 2 amp. par tonne) :

Voitures de	5 à 6 t.	11	amp.
—	6 à 7 —	13	—
—	7 à 8 —	15	—
—	8 à 9 —	17	—
—	9 à 10 —	19	—
—	10 à 11 —	21	—
—	11 à 12 —	23	—
—	12 à 13 —	25	—

A Rouen, par exemple, où les voitures pèsent 7 à 8 t., on relève au tableau une dépense moyenne de 15 amp. environ par voiture.

Calcul du courant maximum et de la puissance des moteurs. — Pour déterminer le moteur à employer, il faut connaître la puissance maxima qu'il aura à fournir, ce qui fixera en même temps le courant maximum qu'il sera susceptible de consommer.

Il ne suffit pas, pour un service à arrêts fréquents, d'avoir la puissance maxima en régime permanent sur la rampe la plus forte, calculée par l'une des deux méthodes du § 2 ; il faut encore, et c'est là une considération essentielle, comme on l'a vu, s'assurer que les moteurs choisis seront suffisants pour permettre de réaliser sur les diverses rampes l'accélération nécessaire.

On déterminera d'abord cette accélération, par exemple de la manière suivante : on calculera la déclivité moyenne du profil, en traitant séparément les parties du profil où l'on emploie normalement le couplage des moteurs en série et celles où l'on se sert du

couplage en parallèle ; à chacune de ces deux portions du parcours correspondra une certaine vitesse moyenne, d'où l'on déduira l'accélération moyenne nécessaire pour réaliser la mise en vitesse sur la rampe moyenne en un temps donné ; on pourra prendre cette durée égale à 10 ou 15 secondes sur un tramway et on en déduira l'effort moteur nécessaire ; d'autre part, on se donnera a priori l'effort accélérateur en palier d'après les chiffres d'expérience (p. 555), c'est-à-dire 40 à 60 kg. par tonne ; on prendra le plus grand de ces deux efforts et on s'assurera que les moteurs peuvent bien le fournir sans dépasser leur régime maximum temporaire.

Exemple. — Prenons comme exemple le cas de la ligne déjà étudiée ci-dessus (p. 610).

Admettons comme rendement moyen des moteurs les chiffres de 0,73 en palier et 0,78 en rampe. On se donne le coefficient de traction en palier, soit 10 kg : t. La voiture automobile pèse en charge 11 t., et son poids d'inertie est de 13,5 t. On connaît le profil de la ligne et les vitesses moyennes à réaliser.

La partie urbaine du parcours, où les moteurs sont normalement en série, a une longueur simple de 4 016 m., ce qui fait 8 032 m. pour l'aller et le retour ; la vitesse après démarrage y sera en moyenne de 13,5 km : h. La longueur du parcours aller et retour extra muros, où les moteurs sont en parallèle, est de 5 860 m., et la vitesse après démarrage y atteint en moyenne 20 km : h. On peut admettre en moyenne 3 arrêts par km., soit 24 arrêts sur le premier tronçon et 17 sur le second.

La vitesse moyenne sur le parcours entier est ainsi de 15,6 km : h. environ.

Cela posé, on calcule d'abord les consommations, puis la puissance moyenne.

1° *Consommations.*

Travail total :

$$\frac{11 \times 10 \times 13\,892}{0,73} = 2\,093\,315 \text{ kgm.} = 5\,704,3 \text{ w.-h.}$$

Travail supplémentaire sur les rampes (les courbes étant remplacées par des rampes équivalentes) :

$$\frac{11}{0,78}\, \Sigma\, l\,(i - 10) = 904\,077 \text{ kgm.} = 2\,463,6 \text{ w.-h.}$$

Énergie dépensée pour les démarrages (en négligeant les compensations aux arrêts) :

$$\text{En ville : } \quad \frac{24 \times 13,5 \times (10.5)^2}{30} = 1\,190,7 \text{ w. h.}$$

$$\text{Hors de la ville : } \quad \frac{17 \times 13.5 \times (20)^2}{30} = 3\,060 \text{ w.-h.}$$

Énergie totale dépensée, aller et retour : 12 418,6 w.-h.,

soit par voiture-kilomètre, $\frac{12\,418,6}{13,892} = 893,9$ w.-h.

et par tonne-kilomètre, $\frac{893,9}{11} = 81,26$ w.-h. [1]

Vitesse moyenne (arrêts non compris) :

En ville	10,24	km : h.
Hors de la ville	16,14	—
Parcours entier (aller et retour)	12,11	—

Courant moyen sur le parcours (arrêts non compris) :

urbain : $\frac{893.9 \text{ w.-h : km.} \times 10.24 \text{ km : h.}}{500 \text{ volts}} = 18,3$ amp.

suburbain : $\frac{893,9 \times 16.14}{500} = 28,85$ amp.

entier : $\frac{893,9 \times 12.11}{500} = 21,65$ amp.

Vitesse commerciale (arrêts compris) :

En ville	9,08	km : h.
Hors de la ville	13,507	—
Parcours entier (aller et retour)	10,54	—

Courant moyen sur le parcours (arrêts compris) :

urbain : $\frac{893.9 \text{ w.-h : km.} \times 9,08 \text{ km : h.}}{500 \text{ volts}} = 16,65$ amp.

suburbain : $\frac{893.9 \times 13,507}{500} = 22,15$ amp.

entier : $\frac{893.9 \times 10,59}{500} = 18,84$ amp.

2° *Puissance de traction des moteurs.*

Déclivité moyenne équivalente, courbes comprises [2], aller et retour :

$$\frac{\Sigma\, cl}{\Sigma\, l} = 0,000\,62.$$

Effort moyen en marche :

$$11\,(10 + 0,62) = 116,82 \text{ kg.}$$

[1] Sur le même parcours sans rampes ni arrêts, la consommation spécifique en palier serait seulement de $\frac{5\,704,3}{13,892 \times 4} = 37,3$ w.-h : t.-km. ; les rampes et les arrêts la doublent, la ligne considérée étant très accidentée.

[2] Sans les courbes la déclivité moyenne serait nulle.

Accélération moyenne nécessaire pour atteindre 10,5 km : h. en 15 secondes :

$$\frac{10,5}{15} = 0,7 \text{ km : h : s.}$$

Effort accélérateur :

$$\frac{13\,500}{9,81} \frac{0,7}{3,6} = 267,6 \text{ kg.}$$

Effort moteur à la jante :

$$116,82 + 267,6 = 384,42 \text{ kg.}$$

Effort résistant sur la rampe maxima (45 mm : m.) :

$$(45 + 10)\ 11 = 605 \text{ kg.}$$

Pour satisfaire à ces conditions, il faut deux moteurs pouvant développer ensemble 700 à 800 kg. pendant 1 minute au maximum au démarrage et pouvant supporter normalement les courants moyens déterminés plus haut. On cherchera parmi les modèles connus un type répondant à ces exigences ; par exemple, les deux moteurs définis par les courbes de fonctionnement de la figure 568 (p. 155), qui peuvent supporter normalement 25 à 40 ampères, satisfont au programme ; ils réalisent les efforts moyens aux vitesses de 13 et 25 km : h.[1].

On pourra alors achever le calcul en se servant de ces courbes. On trouve que chaque moteur prendra pour le démarrage en palier 25 ampères.

Sur la rampe de 45 mm : m. le courant normal de régime est de 33,5 amp. et la vitesse de régime de 7,1 km : h. Chaque moteur est capable de supporter le courant de 37 à 40 amp. nécessaire pour développer 350 à 400 kg. à la jante ; la limite de 40 amp. sera marquée sur l'ampèremètre du mécanicien, si on a le soin de lui en donner un, comme nous le conseillons. Supposons qu'on s'en tienne à 37 amp. ; l'effort moteur correspondant étant de 700 kg., l'effort accélérateur sera de 95 kg. et pourra produire une accélération de

$$\frac{95}{13,5} \times \frac{9.81}{3,36} = 0,25 \text{ km : h : s.}$$

La vitesse normale sur cette rampe, 7,1 km : h., pourra donc être atteinte en $\frac{7,1}{0,25} = 28,4$ secondes, ce qui n'a rien d'exagéré.

Ce calcul est si court qu'il nous paraît inutile de recourir pour s'en dispenser à des formules empiriques qui n'offrent pas la même garantie. Nous citerons cependant la formule suivante, due à MM. Crosby et Bell[2], qui prétend indiquer l'intensité au démarrage en fonction de l'intensité normale :

$$I' = I \frac{3\beta + i}{\beta + i},$$

[1] Il est désirable, comme on l'a vu plus haut (p. 555), que les moteurs puissent donner une vitesse supérieure de 15 ou 20 p. 100 à effort égal, pour se réserver la marge nécessaire en cas de retard à rattraper ; mais on peut réaliser des vitesses encore plus élevées pour se réserver la possibilité de la marche en dérive.

[2] *Electric traction*, 1892.

où I est l'intensité de régime sur la rampe i, i la déclivité en millimètres par mètre, β le coefficient de traction en palier en kg. par tonne et I' le courant nécessaire au démarrage.

Cette formule, qui réduit dans une certaine mesure l'augmentation relative de courant sur les rampes, donne, par exemple sur un tramway où $\beta = 10$ kg., les chiffres suivants :

Rampe $i = 0$			$I' = I \times 3$	
—	1 p. 100		—	2
—	2	—	—	1 2/3
—	3	—	—	1 1/2
—	4	—	—	1 2/5
—	5	—	—	1 1/3

Mais elle a un caractère absolument artificiel et semble peu satisfaisante en ce qu'elle conduit malgré tout à des courants exagérés sur les fortes rampes.

Mieux vaut, croyons-nous, s'en tenir à la fixation d'un courant maximum invariable et maintenir plus ou moins longtemps les moteurs au couplage en série. Sur certaines rampes très fortes, on doit même conserver ce couplage sans passer à la mise en parallèle, de peur de faire sauter les plombs fusibles. L'effort moteur est alors le double de celui que suppose la méthode à accélération constante pour la même intensité de courant totale.

§ 3. — Données empiriques

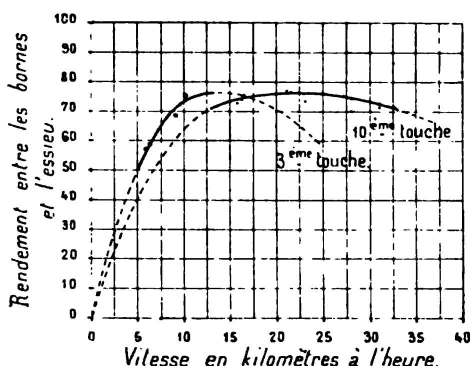
Pour faciliter les calculs approchés que nous venons d'indiquer ou tout au moins leur vérification, il est bon de connaître les résultats d'expériences relevés sur des lignes analogues à celles qu'on considère. Ce sera l'objet du présent paragraphe.

Valeurs pratiques des rendements des moteurs. — Les renseignements que nous avons pu recueillir relativement aux rendements des moteurs tendent à établir que les chiffres indiqués par les constructeurs d'après leurs essais de laboratoire et dont le tableau de la page 122 (t. I) donne les valeurs ordinaires sont, en général, un peu supérieurs à la réalité au bout d'un certain temps de service, par suite de l'usure ou de l'encrassement des engrenages et des coussinets. On fera donc bien de les réduire à toute charge d'environ 5 p. 100, ce qui revient à considérer cette perte supplémentaire comme constante : par exemple, pour un moteur indiqué comme donnant 0,75 de rendement à 1/3 de charge, 0,80

à 1/2 charge et 0,85 à pleine charge, on abaissera ces chiffres respectivement à 0,70, 0,75 et 0,80.

On peut considérer, en général, que les valeurs de 0,75 à 0,78 sont des limites pratiques du rendement maximum *en service* pour un moteur de tramways, engrenages compris, et 0,80 à 0,85 les limites correspondantes pour un moteur de chemins de fer à engrenages ou gearless.

Les figures 873 et 874 donnent, d'après des relevés effectués par M. H. S. Hering sur des voitures en service courant, une bonne idée du fonctionnement



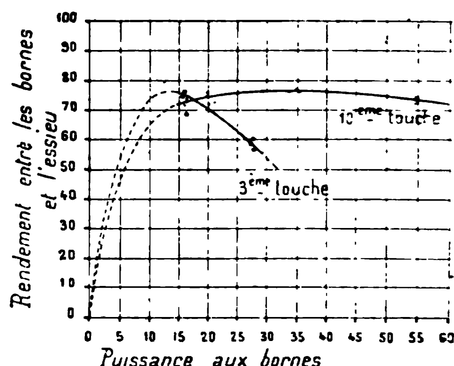


Fig. 873 et 874. — Courbes de rendement en service de deux moteurs de tramways Westinghouse (n° 3) de 25 chevaux.

pratique des moteurs de tramways à simple réduction. Un moteur des tramways du South Staffordshire, démonté après plusieurs mois de service et essayé au frein, a donné un rendement maximum de 0,78. Le même chiffre a été trouvé dans des essais effectués sur une voiture équipée par la Compagnie de Fives-Lille et rapportés par M. de Marchena[1]. M. Baily a trouvé sur les petites locomotives à transmission par vis sans fin des mines de Marles des rendements de 0,67 à 0,74 sur l'essieu (donnant au crochet 0,50 à 0,58[2]). Des expériences, rapportées plus loin, qui ont été faites à Budapest sur des voitures équipées par la maison Siemens et Halske avec deux moteurs à chaînes (voir t. I, p. 108) ont conduit à un maximum de 0,82 ; mais ce résultat semble exceptionnel. Au contraire, un moteur Siemens à simple réduction, cependant moderne, des voitures de Hanovre aurait donné seulement, d'après M. Ross, un maximum de 0,68, comme le montre le tableau suivant[3] :

[1] La traction mécanique des tramways, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, juillet 1894.

[2] *Publications de la Société des Ingénieurs du Hainaut*, t. I, 3e fasc., 1892.

[3] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1er avril 1897.

INTENSITÉ DU COURANT	VITESSE en kilomètres : h.	VOLTAGE aux bornes.	RENDEMENT industriel.
			p. 100.
à vide. { 14,76	15,084	193,6	0
à vide. { 17,85	25,704	364	0
18,11	21,852	504,0	53,7
24,37	19,548	506,4	61,5
23,77	19,692	507,2	63,5
30,51	16,452	490,9	66,6
37,25	14,652	481,4	67,6
21,50	6,696	186,6	65,2
22,57	13,176	348,0	65,2

Les mesures les plus précises que nous possédions sur les rendements des moteurs de tramways sont celles exécutées récemment par M. Fischinger[1] sur un moteur de la société Kummer et que résument les courbes des figures 875

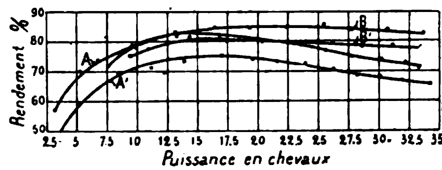


Fig. 875. — Rendements d'un moteur de tramways sous différentes charges avec et sans engrenages.

Courbe A : moteur sans engrenages, pleine excitation ; A' : moteur avec engrenages, pleine excitation
— B — demi-excitation ; B' — demi-excitation.

et 876. La première donne comparativement les rendements du moteur seul et du moteur muni de son train d'engrenages. On voit qu'à puissance égale.

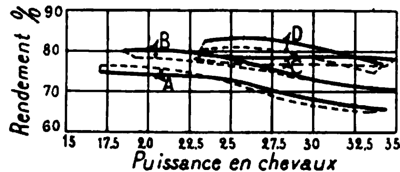


Fig. 876. — Rendements d'un moteur de tramways à différents degrés d'excitation.

A, pleine excitation.
B, 75 p. 100 de l'excitation maxima.
C, 50 p. 100 —
D, 33 p 100 —
Traits pleins : graissage à l'huile. — Traits pointillés : graissage à la graisse consistante.

rendement est plus faible à pleine excitation qu'à demi-excitation, parce que, la vitesse étant moindre, l'effort transmis est plus grand. Aussi nous parait-il plus rationnel de faire la comparaison à effort de traction égal suivant les

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 23 décembre 1897.

courbes de la figure 877, que nous avons calculées d'après la caractéristique du moteur.

La figure 876 indique comparativement les rendements obtenus en graissant les engrenages avec de la valvoline (traits pleins) et avec de la graisse consistante (traits pointillés). Cette dernière donne lieu à des pertes plus élevées, sauf aux faibles charges avec pleine excitation. M. Fischinger croit pouvoir expliquer ce fait curieux par l'insuffisance de graissage résultant de la difficulté qu'éprouve la graisse à pénétrer entre les dents lorsque la pression est très forte.

Le moteur qui a servi à ces essais est analogue au moteur Kummer décrit

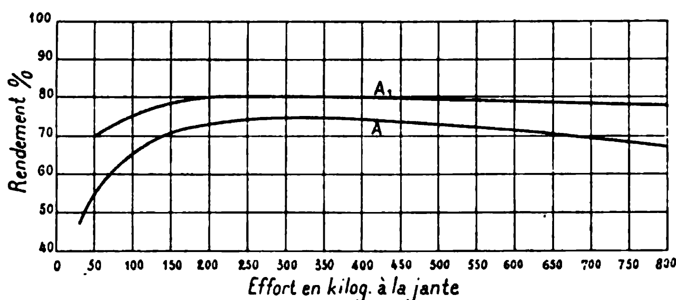


Fig. 877. — Rendements du même moteur sans engrenages rapportés aux efforts à la jante.

A, pleine excitation. — A', demi-excitation.

plus haut (t. I, p. 230), avec cette différence qu'il s'adapte à la voie étroite et pèse seulement 1 150 kg.; les engrenages sont formés d'un pignon en acier durci à 15 dents et d'une roue en acier fondu à 76 dents; la réduction est sensiblement de 1 : 5; la distance d'axe en axe entre l'essieu et le pignon est de 360 mm.

En ce qui concerne les moteurs gearless, ceux de Short, cités précédemment (t. I, p. 148), ont donné 0,83 isolément et 0,77 couplés par deux en parallèle[1]; les moteurs de l'État belge (voir t. II, p. 105, et t. I, p. 427) donnent à 500 volts les rendements suivants[2] :

COUPLAGE	PUISSANCE MOYENNE	PLEINE PUISSANCE
2 moteurs en série	0,760	0,677
— en parallèle	0,804	0,815

[1] *Street Railway Journal*, octobre 1891.

[2] E. Gérard, Note sur l'emploi des moteurs gearless, *Bulletin de la Commission Internationale des Chemins de fer*, juin 1895, 2e fascicule.

Le rendement de 0,88, attribué par M. Parker aux moteurs du chemin de fer électrique de Liverpool[1], semble bien élevé; quant à celui de 0,94, indiqué pour les moteurs des locomotives du City and South London Railway, par M. Al. Siemens[2], c'est évidemment un rendement *électrique*, qui n'a rien de commun avec le rendement industriel que nous considérons ici.

Sur les lignes à démarrages fréquents, les maxima ci-dessus ne sont atteints que pendant une partie du parcours. Pendant la mise en vitesse, le rendement s'abaisse à des chiffres bien plus faibles, dont la valeur dépend du mode de régulation employé et de l'habileté du mécanicien. Nous ne reviendrons pas ici sur la comparaison que nous avons faite à ce point de vue au chapitre XII (p. 173) entre la méthode du rhéostat et la méthode série-parallèle et dont nous avons conclu que cette dernière doit être seule employée aujourd'hui[3] ; même dans ce cas, la nécessité d'intercaler des résistances fait que le rendement pratique pendant la mise en vitesse ne dépasse guère, comme nous l'avons dit plus haut (p. 643), 0,50 sur les tramways et 0,60 sur les chemins de fer, ce qui réduit d'autant plus le rendement moyen que les démarrages sont plus nombreux. Sur le City and South London Railway et sur le chemin de fer aérien de Liverpool, on a trouvé en service le chiffre de 0,70. Sur le Metropolitan Elevated de Chicago, M. Gerry estime[4] que le rendement moyen des moteurs, pour un parcours complet, est de 10 à 20 p. 100 plus faible (suivant l'habileté du mécanicien) que s'il n'y avait pas d'arrêts. Sur les tramways, la réduction de rendement occasionnée par les démarrages ne descend guère au-dessous de 20 p. 100 et atteint quelquefois bien davantage.

On peut en définitive prendre pour *rendement moyen* applicable au parcours entier avec arrêts les chiffres de 0,60 sur un tramway et de 0,65 à 0,70 sur un métropolitain, sans crainte d'être trop au-dessous de la vérité.

Résultats d'expériences relatifs aux dépenses d'énergie sur les voitures. — Les dépenses d'énergie relevées sur diverses lignes sont encore plus difficilement comparables que les chiffres de rendement, car elles dépendent non seulement du mode d'exploitation, du nombre des arrêts, du système de régulation et de l'habileté du mécanicien, mais encore du type de voie, des déclivités, des courbes et du matériel roulant.

Bien souvent les résultats publiés par les ingénieurs de tramways ne donnent aucun renseignement sur ces points cependant capitaux ; beaucoup n'indiquent même pas le poids des voitures et

[1] *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 27 février 1894.

[2] *British Association*, août 1892.

[3] Nous ajouterons qu'aux Tramways bruxellois on dit avoir constaté une économie de 10 p. 100 par la substitution de la méthode du shunt à la méthode de la boucle ; ce chiffre nous paraît fort.

[4] *Trans. Am. Inst. El. Eng.*, 27 juillet 1897.

signalent seulement les consommations par *voiture-kilomètre*, comme si ce terme pouvait avoir un sens dans une industrie où l'on emploie suivant les cas des voitures dont le poids varie de 6,5 à 12 tonnes et parmi lesquelles les unes marchent isolées et les autres remorquent des voitures d'attelage. Les seuls essais intéressants sont ceux où la dépense peut être rapportée à l'unité de poids transportée, de façon à faire ressortir ce que nous avons appelé déjà la *consommation spécifique* en watts-heures par tonne-kilomètre.

Enfin, pour chaque matériel, il y a une vitesse, variable avec la déclivité et la charge, qui assure la moindre consommation. Si donc on a relevé une consommation spécifique sur une ligne où la vitesse varie de 15 à 30 km : h., comme sur beaucoup de lignes américaines, il ne faut pas croire que le même matériel donnerait la même consommation spécifique sur des lignes européennes à vitesse variant de 8 à 16 km : h. : les moteurs devront d'abord être modifiés pour s'adapter à ces nouvelles vitesses ; dans ces conditions, leur couple restant à peu près le même, à densité de courant égale, bien qu'un peu diminué par l'augmentation du nombre de spires qui utilisent moins bien l'espace disponible sur l'armature, ils s'appliqueront à un matériel équivalent ; les pertes d'énergie au démarrage se trouveront diminuées en vertu d'une remarque déjà faite plus haut (p. 644) ; de sorte qu'ils permettront de trouver des consommations spécifiques un peu plus faibles.

Celles que nous allons indiquer pour les lignes américaines doivent donc être considérées, au point de vue européen, comme des maxima par rapport aux chiffres effectivement relevés sur nos lignes.

Les essais effectués aux États-Unis ont donné des chiffres très variés ; les consommations, très grandes autrefois, ont beaucoup diminué depuis l'adoption des matériels modernes perfectionnés. Nous citerons les suivants, qui sont les plus connus et dont nous ramenons les résultats à la base uniforme de comparaison définie ci-dessus.

Essais du Dr F. Bedell à Rochester (1891)[1]. — Voitures munies de 2 moteurs Short à double réduction. Voie presque entièrement en palier. Vitesse

[1] *Sibley Journal*, 1891.

moyenne 10,4 km : h.; poids de la voiture 8,375 t. Puissance moyenne dépensée en marche 13,5 HP ou 10 100 watts. D'où la consommation spécifique de

$$\frac{10\,100}{8{,}375 \times 10{,}4} = 116 \text{ w.-h. par tonne-km.,}$$

qui se réduit, en tenant compte des arrêts, à 101 w.-h. moyens par t.-km. Ce chiffre élevé s'explique par le frottement des engrenages ; on a trouvé, en effet, comme effort total nécessaire pour remorquer une automobile en palier, la valeur élevée $\beta + \rho = 19$ kg. par tonne.

Essais de MM. Wood et Palmer à Buffalo (1892)[1]. — Ligne sans déclivité supérieure à 2,5 p. 100 ; bonne voie. Voitures d'environ 8 t. équipées avec 2 moteurs Thomson-Houston de 15 chev. Même puissance dépensée par tonne que dans l'essai précédent ; la vitesse n'est pas spécifiée ; mais elle était probablement aussi la même, ce qui conduit au même chiffre moyen d'environ 100 w.-h. par t.-km.

Un autre essai effectué à la même époque dans une ville de l'Ouest des États-Unis a conduit à des chiffres analogues.

Essais de MM. G. D. Shepardson et E. P. Burch à Minneapolis (1892)[2]. — Ligne à déclivités modérées. Vitesse moyenne, mais non spécifiée. Les résultats trouvés sont les suivants :

État de la voie	sèche	mouillée	couverte de neige
Nombre d'arrêts	38	50	36
Voltage moyen	445	450	440
Courant moyen pendant la marche	23,4	20,9	28,1
Watts moyens — —	6 900	9 800	12 400
Courant moyen, arrêts compris	15,15	14,9	17,5
Watts moyens — —	5 500	6 700	7 700

Il manque malheureusement les données sur le poids et la vitesse des véhicules.

Essais de MM. J. Lyman et C. E. Hewitt à Ithaca[3]. — Automobile de 8 t. avec 2 moteurs Thomson-Houston W. P. de 25 chev. remorquant un fourgon à bagages de 8,4 t. Les essais ont compris l'aller et retour sur une ligne en palier à deux vitesses différentes et ont donné les résultats ci-après :

Vitesse moyenne	9,50 km : h.	16,3 km : h.
Courant moyen	18,7	35
Voltage moyen	456	456
Watts moyens consommés	8 520	15 960
Watts-heures par tonne-kilomètre	90	98

[1] *Sibley Journal*, janvier 1895, p. 141.
[2] *Trans. Am. Inst. El. Eng.*, vol. IX, 1892.
[3] *Sibley Journal*, janvier 1895.

Le coefficient total $\beta + \psi$ d'une automobile remorquée a été trouvé égal à 19 ou 20 kg. par tonne, comme dans les essais de M. Bedell.

Essais de M. H. S. Hering à Baltimore (1893-1894)[1]. — Nous choisissons dans le dédale de chiffres publiés par cet auteur ceux qui correspondent à un service régulier avec arrêts tous les 300 ou 400 mètres, sur des voies urbaines à rails à gradin. Voitures de 8 t. environ, à truck Bemis, équipées avec 2 moteurs Westinghouse à simple réduction n° 3 de 25 chev. Vitesse comprise entre 9 à 21 km : h.

La dépense spécifique a varié de 80 à 105 w.-h. par t.-km. Ces chiffres élevés proviennent du grand nombre des arrêts, car les mêmes voitures, marchant sans arrêt sur une voie Vignole du Baltimore and Pikesville Road, en dehors de la ville, à des vitesses de 20 à 30 km : h., n'ont dépensé que 52 à 55 w.-h. par tonne-km., au lieu de 105 en service régulier; du reste, la dépense pour chaque démarrage à la vitesse de 16 km : h. a été trouvée égale à 85 w.-h. ; quelques arrêts, même partiels, suffisent donc à augmenter notablement la dépense.

Essais de M. G. F. Sever à Brooklyn (1895)[2]. — Essais effectués sur une voie sensiblement en palier du Coney Island and Brooklyn Railway, entre Fulton Ferry et Coney Island. Voitures à deux essieux convergents munies de 2 moteurs G. E. 800 ou analogues, dont l'un a été enlevé au cours des essais. Temps sec. Vitesse moyenne ; pas d'arrêts.

Les chiffres de consommation spécifique moyens ont été de 50 à 55 w.-h. par tonne-km. avec 2 moteurs et de 29 w.-h. seulement avec 1 moteur, ce qui, en passant, prouve l'avantage de l'équipement simple à ce point de vue.

Essais de MM. H. P. Curtiss et H. O. Pond sur le Buffalo and Niagara Falls Railway (1895)[3]. — Voitures à double truck à 4 moteurs G. E. 800. Rails à gradin. La vitesse a atteint un maximum de 67 km : h. C'est un chemin de fer sur route plutôt qu'un tramway urbain; néanmoins, ces essais sont intéressants parce que ce sont les seuls existants, à notre connaissance, sur le matériel à 4 moteurs.

A la vitesse moyenne de 36,8 km : h. et au voltage moyen de 513,1 volts, le courant moyen a été de 63,4 amp., ce qui fait une puissance moyenne de 32 520 watts.

La consommation spécifique correspondante, en marche continue, est de

$$\frac{32\,520}{36,8} = 88 \text{ w.-h. par tonne-km.}$$

Mais il faut ajouter que la ligne n'est pas entièrement en palier.

Essais de M. Vaughan[4]. — Ligne assez accidentée de 30 km. de longueur; 10 voitures. La consommation est de 677 w.-h. par voiture-km. au wattmètre des voitures. Celles-ci pesant 8 à 10 t., on voit que la consommation spécifique est comprise entre 70 et 80 w.-h. par tonne-km. en service.

[1] *Electric Railway Gazette*, août à novembre 1895.
[2] *Electric Power*, mai 1895.
[3] *Sibley Journal*, mai 1896, et *Street Railway Review*, juillet 1896.
[4] *Éclairage Électrique*, 1896.

Résultats d'exploitation des tramways de Montreal. — Le réseau de tramways de la Montreal Street Railway Co. ne présente pas de difficultés spéciales ; les lignes orientées du Sud au Nord présentent une déclivité continue et quelquefois assez forte, mais les autres sont sensiblement en palier; il y a 100 à 140 voitures légères en service, la voie en rails à gradin est excellente et les feeders sont nombreux. On a relevé à la station, pour l'année 1895, les résultats suivants, que nous empruntons à un tableau beaucoup plus complet publié par le directeur, M. G. C. Cunningham [1] :

Nombre de voitures-kilomètres parcourus	voitures motrices. .	9 135 228
	voitures remorquées.	1 052 378
	Total.	10 187 606
Nombre correspondant de tonnes-km.		58 839 115
Voyageurs transportés par train-km		2,55
Vitesse moyenne		11,89 km : h.
Charbon consommé par voiture-km. automobile . . .		2,115 kg.
— — — de toute nature .		1,9 —
— — par tonne-km.		0,30 —
— — par voyageur km.		0,47 —
Énergie consommée à la station par tonne-km. . . .		193,4 w.-h.
— — — par cheval-heure aux machines		608 w.-h.
Coefficient de traction moyen des voitures		9,6 kg : t.

Essais effectués sur le réseau de la Consolidated Traction Co. du New Jersey [2]. — On a choisi une section de voie de 4 km. de longueur avec des déclivités variant de 2 à 5 p. 100, qu'on faisait parcourir à chaque voiture essayée dans les deux sens. La charge utile par voiture était dans chaque cas de 270 kg. On s'arrêtait un certain nombre de fois en route, mais moins qu'en service courant. Les moyennes d'un assez grand nombre d'essais ont donné les résultats résumés dans le tableau ci-après :

TYPE DE VÉHICULE	POIDS à vide.	POIDS en charge.	ÉNERGIE électrique consommée en kilowatts-heures.
	t.	t.	
Voiture à bogies de 6,70 m. de longueur de caisse.	9,500	9,770	16,4
Voiture à 2 essieux de 5,50 m. de longueur de caisse.	8,200	8,470	11,8
Voiture à 2 essieux de 4.90 m. de longueur de caisse.	7,300	7,570	10,3

[1] *Street Railway Journal*, décembre 1895.
[2] *Street Railway Journal*, août 1896.

Essais faits à Saint-Louis. — Des essais intéressants, rapportés par M. R. McCulloch [1], ont été exécutés à Saint-Louis en 1896 sur deux lignes, dont l'une a en service 44 voitures à bogies de 7,93 m. de longueur de caisse, à 36 places, pesant 10,730 t. et faisant chacune un parcours moyen de 21 km. par voyage, et l'autre 77 voitures à 2 essieux, de 6,10 m. de longueur de caisse, à 28 places, pesant 7,300 t. et effectuant un trajet moyen de 18,5 km. (dans 28,4 p. 100 des voyages, les voitures automobiles remorquent chacune une voiture d'attelage, en sorte qu'il faut ajouter en moyenne 7,5 places à la capacité des automobiles, ce qui donne 35 places comme capacité moyenne de chaque train).

Les consommations d'énergie trouvées sont les suivantes :

TYPE DE VÉHICULE	NOMBRE MOYEN de watts par voiture.	VITESSE MOYENNE en kilomètres à l'heure.	NOMBRE MOYEN de watts-heures par voiture km.	SUPPLÉMENT d'énergie absorbée par les voitures à bogies en watts-heures par voiture-km.	POURCENTAGE d'augmentation.
Voitures à 2 essieux. . .	8 640	13,8	624		
Voitures à bogies	12 345	15,4	804	180	29

Les données européennes sont également très variées, comme le montrent les exemples ci-après :

Essais de Siemens et Halske à Budapest (1892) [2]. — Ces essais ont été effectués les uns en palier, les autres en rampe de 10 p. 100 ; les premiers seuls nous intéressent ici. Les voitures pesaient 4,2 t. à vide et 6,375 t. en charge. Les essais ont été faits sans arrêt et successivement avec des voitures à un et deux moteurs sur des voies Haarmann où le coefficient de traction *r* était évalué à 15 kg. par tonne. On a trouvé les chiffres moyens suivants :

Nombre d'essieux moteurs	2	1
Vitesse en km : h	22,03	22,46
Volts	282,5	285
Ampères	26	24,5
Watts.	7345	6982,5
Watts par tonne.	1080	1035
Watts-heures par tonne-kilomètre (sans arrêt).	50	45

[1] *Street Railway Journal*, octobre 1896.

[2] *Lumière Électrique*, 4 mars 1893.

L'économie réalisée par l'emploi d'un moteur au lieu de deux est donc de 10 p. 100. Le chiffre de 50 w.-h. se rapproche beaucoup des derniers chiffres américains cités.

Essais faits sur les tramways de Paris et du département de la Seine. — Les premiers essais exécutés par M. Sarcia en 1895 [1] ont été faits de façon à déduire un coefficient de traction *global* et fictif. Celui-ci a été trouvé en moyenne de 8,06 kg. par tonne sur rails Vignole et de 11,25 sur rails Broca. Les consommations spécifiques en w.-h. par tonne-km. qui s'en déduisent en multipliant par le rapport

$$\frac{9,81 \times 1000}{3\,600} = 27,2$$

sont respectivement de 21,1 et 29,5 w.-h. Il s'agit de trajets sans arrêt.

Sur les voitures à accumulateurs des lignes de la Madeleine à Courbevoie-Neuilly et Levallois, on a trouvé des dépenses de 545 w.-h. par voiture-kilomètre; le poids des voitures étant de 14 t. en charge, la consommation spécifique est de 39 w.-h. par tonne-km.; la dépense correspondante à l'usine est de 775 à 840 w.-h. par voiture-km. et de 55 à 60 w.-h. par tonne-km., et nécessite une consommation de 2,59 kg. de charbon par voiture-km.

Autres résultats d'expériences en France. — Nous pouvons citer encore comme chiffres intéressants les consommations en service courant des voitures du Havre (650 à 800 w.-h. par voiture-km. de 6,5 t. pesant en charge 9 t. en moyenne; vitesse maxima 20 km : h.; vitesse commerciale 10 km : h.) et de Rouen (mêmes voitures; vitesse un peu moindre; 550 w.-h.). Ces chiffres donnent environ 70 à 90 w.-h. par t.-km. dans le premier cas et 61 dans le second; la différence provient surtout de ce que le réseau du Havre est très accidenté; les rails sont à ornière dans les deux cas.

A Fontainebleau, sur une voie en partie Vignole et en partie Broca, la consommation moyenne aux mêmes vitesses est de 65 w.-h. par t.-km. pour une automobile seule, et de 45 w-h : t.-km. pour une automobile avec une voiture d'attelage.

Essais de M. Dickinson sur la ligne de Walsall-Darlaston [2] (1894). — Ces essais ont porté sur deux types de matériel roulant : 1° voitures de 40 places à 2 essieux moteurs; 2° voitures de 50 places à bogies avec un moteur par bogie. A la vitesse de 11,6 km : h., on a trouvé comme puissance électrique moyenne nécessaire 10 chev. pour les premières et 13 chev. pour les secondes, ce qui correspond respectivement à 7 460 et 9 700 watts. En admettant pour ces voitures en charge des poids respectifs de 10 et 12 t., on arrive à des consommations spécifiques de

$$\frac{7460}{8 \times 11,6} = 64 \text{ w.-h. par tonne-km.}$$

et

$$\frac{9700}{10 \times 11,6} = 69,6 \text{ w.-h. par tonne-km.}$$

[1] *Industrie Électrique*, 10 décembre 1895.

[2] *Bull. de l'Association des Ingénieurs de l'Institut Montefiore*, 22 septembre 1894.

Essais de M. F. Ross à Hanovre[1]. — Ces essais ont été faits avec des voitures à traction mixte (accumulateurs et trôlet) sur une ligne de 4 070 m. de longueur ayant relativement peu de courbes et présentant seulement en deux points des rampes de 20 mm : m. La charge n'était d'abord que de 7 personnes, ce qui faisait un poids total d'environ 7 t. ; puis on a ajouté le poids de la batterie, 2 400 kg., ce qui a donné environ 9,5 t.

Dans des parcours sans arrêt, la dépense a été de 484 w.-h. par voiture-km. pour les deux cas, soit 69 et 54 w.-h. par tonne-kilomètre respectivement, à des vitesses de 4,4 m : s. et 3,94 m : s.

Avec la voiture non chargée et les arrêts normaux, la dépense s'est élevée à 565 w.-h. par voiture-km. ou 80 w.-h. par tonne-km.

Sur un parcours effectué avec les accumulateurs, en observant les arrêts réguliers, la dépense s'est abaissée à 380 w.-h., soit 40 w.-h. par tonne-km., ce qui provenait à la fois de la vitesse plus faible (2,6 m : s.) et du rendement plus avantageux des moteurs à 200 volts qu'à 500, ainsi qu'on l'a constaté.

On a trouvé que les accumulateurs n'utilisent que 25 p. 100 de leur capacité et ont un rendement moyen en service de 70 à 74 p. 100.

Essais de M. E. Sieg à Cologne[2]. — D'intéressants essais ont été faits à Cologne sur une voie d'expériences de 335 m. de longueur, dont 181 m. en courbes de 50, 30, 25 et 15 m. de rayon et 154 m. en ligne droite, avec une rampe de 2 p. 100 sur 54 m. et une courte rampe de 5 p. 100. La voiture pesait à vide 6,5 t. et était munie d'une batterie d'accumulateurs de 2,9 t. Le tableau suivant résume les résultats trouvés :

CONDITIONS DE L'ESSAI	POIDS TOTAL en tonnes.	VITESSE MOYENNE en km : h.	CONSOMMATION en watts-heures par voiture-kilomètre.	WATTS-HEURES par tonne-kilomètre.
Voiture vide, sans arrêt	9,4	18	240	25,5
— — , sur rampe de 2 p. 100.	9,4	14	716	76,2
Voiture vide, avec 3 arrêts par km. .	9,4	12,6	340	36,2
Voiture en charge (30 à 40 personnes), sans arrêt.	11,9		340	28,6
Voiture en charge, avec 3 arrêts par kilomètre, sur rampe de 2 p. 100.	11,9	11	550	46,2

Données recueillies dans les stations centrales de tramways allemandes. —

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1er avril 1897, p. 178.

[2] *Elektrotechnische Zeitschrift*, *ibid.*, p. 201. Les anomalies apparentes des chiffres s'expliquent sans doute par l'accroissement du rendement avec la charge et par la diminution des résistances avec la vitesse.

Les données suivantes, recueillies dans les stations centrales allemandes par l'Union permanente des Tramways [1], ne sont pas des résultats d'essais, mais des résultats d'exploitation; ce sont donc des moyennes fort intéressantes.

Malheureusement, les chiffres donnés pour la voiture-kilomètre s'appliquent à un matériel mixte comprenant des automobiles de 28 à 32 places pesant 5 à 6 t. et des voitures remorquées de 2 t. environ, et il est difficile de faire la part de chaque type de véhicule dans ces relevés, où ne figure pas d'ailleurs le nombre de voyageurs; nous admettrons que ceux-ci pèsent, en moyenne, 1 t. par voiture.

A Hambourg, sur un réseau en palier, la dépense moyenne par voiture-km. est de 450 w.-h., correspondant, d'après la société exploitante, à une moyenne de 67 w.-h. par tonne-km. A Gera, où les rampes sont négligeables, la dépense moyenne est de 490 w.-h. par voiture-km.; à Zwickau, dans les mêmes conditions, on accuse seulement 360 w.-h., à Aix-la-Chapelle, 370 w.-h. sur les parties en palier, à Baden-Vöslau, 300 w.-h.

Les différences proviennent évidemment de la plus ou moins grande proportion de voitures d'attelage dans le total et du mode de régulation.

Il semble permis de conclure que la dépense, sur un réseau urbain peu accidenté, est en moyenne de 500 w.-h. par kilomètre-voiture automobile de 30 places, de 180 à 200 w.-h. par kilomètre-voiture d'attelage et, pour un service mixte, de 300 à 400 w.-h. par voiture-kilomètre.

En divisant le chiffre de 500 w.-h. par le poids de l'automobile en charge moyenne, soit 7 t. environ, on trouve un chiffre de 70 w.-h. par tonne-km., qui diffère peu de celui indiqué plus haut pour Hambourg.

Il est intéressant de comparer ces chiffres à celui relevé à Bruxelles par M. van Vloten sur une ligne d'importance moyenne (21 trains par jour) : la consommation moyenne était de 837 w.-h. par train-kilomètre de 12 t., soit 69 w.-h. par tonne-km.

Résultats d'exploitation de chemins de fer. — Les chemins de fer, grâce à leurs voies sans ornière, donnent lieu à des dépenses d'énergie relativement plus faibles.

Par exemple, les essais effectués sur la ligne de Nantasket Beach ont fait ressortir une consommation de 50,8 et 37,3 w.-h. par tonne-km. dans le parcours des figures 854 et 855 avec 14 et 13 arrêts; le même train de 55 t. effectuant le même parcours sans arrêt consomme seulement 31,8 w.-h. par t.-km. à la vitesse moyenne de 46,5 km : h et 32,5 w.-h à la vitesse de 47,6 km : h. Sur la ligne de Baltimore la dépense est d'environ 35 w.-h. par t.-km.

Les métropolitains à démarrages nombreux consomment davantage.

C'est ainsi qu'on trouve sur le Metropolitan Elevated de Chicago une dépense moyenne de 77 w.-h. par tonne-km. pour les trains étudiés plus haut (p. 579).

La dépense de 129 w.-h. par t.-km. sur le chemin de fer aérien de Liverpool est excessive.

En résumé, on voit qu'actuellement sur les tramways à faibles pentes la dépense totale moyenne d'énergie électrique aux bornes des moteurs *par tonne kilométrique* varie dans des limites assez

[1] Cf. Rapport de M. van Vloten au Congrès de Stockholm, 1896.

étroites, 25 à 100 w.-h. en général. Le chiffre de 25 est encore un minimum un peu exceptionnel, réalisé seulement sur de bonnes voies avec les meilleurs matériels et sans arrêt. En service courant, l'influence des arrêts, des démarrages et des courbes fait qu'on ne descend guère au-dessous de 65 à 70 w.-h., et en Amérique les chiffres de 80 à 100 w.-h. ne sont pas considérés comme extraordinaires. On peut donc, croyons-nous, accepter actuellement comme moyenne à prévoir dans un avant-projet de tramway 70 à 80 w.-h. par tonne kilométrique sur voies à faibles pentes, arrêts compris, et 90 à 100 w.-h. sur voies à déclivités moyennes. Dans ces chiffres les démarrages entrent pour une proportion qu'on peut calculer d'après la méthode indiquée ci-dessus et qui équivaut à peu près à 5 ou 9 w.-h. par tonne et par arrêt suivant que la vitesse normale est de 12 ou de 16 km : h. (voir p. 644).

Sur les chemins de fer les conditions (vitesse et arrêts) sont trop variables pour qu'on puisse encore donner des moyennes.

Il est intéressant de voir dans quelle faible proportion chaque voyageur accroît la dépense d'énergie d'une voiture en service. Par exemple, à Baltimore, M. H. S. Hering a trouvé sur une voiture de tramway que chaque voyageur consomme de 0,3 à 2,6 w.-h. par kilomètre suivant la charge totale et le nombre d'arrêts ; en moyenne, avec une charge de 20 voyageurs et 20 arrêts, dans un parcours effectué sur la ligne de Pikesville Road, la dépense a été trouvée d'environ 1 w.-h. par voyageur-kilomètre (la charge payante sur cette ligne est de 2 à 36 p. 100, moyenne pour la journée 8 p. 100; dans la partie située en ville, elle est seulement de 10 à 15 p. 100).

A la station génératrice, c'est à peine si l'influence du nombre des voyageurs se fait sentir sur la consommation. On voit, par suite, tout l'avantage qu'il y a à réduire le plus possible la tare des voitures pour diminuer la dépense fixe due au poids mort (voir t. I, p. 346). Cette dépense fixe est plus faible naturellement sur les voitures d'attelage ; c'est un motif de plus pour employer celles-ci toutes les fois que cela est possible ; on a vu qu'à capacité égale elles ne consomment guère que 50 p. 100 de la dépense d'une automobile (p. 569).

L'influence du poids mort se fait également sentir quand on compare le matériel à bogies au matériel à deux essieux ; c'est ce qui explique l'économie sensible réalisée par le second relativement au premier.

§ 4. — Puissance des appareils producteurs d'énergie

Objet de ce paragraphe. — Nous pourrions borner à ce qui précède nos indications sur les calculs de traction, car le reste est plu-

tôt affaire de distribution d'énergie. Cependant, nous croyons utile, au point de vue de la suite des idées, de rattacher au calcul de la puissance dépensée par les voitures celui de la puissance à fournir par les appareils producteurs d'énergie qui s'en déduit naturellement. Nous donnerons donc ici les éléments essentiels de ce calcul, sans entrer pour autant dans aucun détail en ce qui concerne les organes de production et de distribution du courant, dont l'étude sort du cadre de cet ouvrage.

Nous distinguerons, comme d'habitude, deux cas, celui des voitures automobiles à accumulateurs[1] et celui des véhicules alimentés par une ligne de distribution.

I. — Traction par accumulateurs

Généralités. — En pratique, pour les motifs indiqués plus haut (t. I, p. 502, et t. II, p. 511), le mode de traction par accumulateurs ne s'applique qu'aux tramways. On sait que la charge peut se faire soit à l'usine génératrice, soit en des postes fixes plus ou moins éloignés alimentés par des feeders, soit enfin en cours de route à l'aide de conducteurs qui alimentent en même temps directement les moteurs sur une partie du parcours. Dans ces deux derniers cas les batteries restent à poste fixe sur les voitures, tandis que dans le premier on les échange à chaque charge.

Le calcul comprend deux parties : la détermination de la batterie à placer sur chaque automobile, et la détermination des machines génératrices de l'usine.

Considérations qui déterminent le choix de la batterie. — Le choix de la batterie dépend d'une part des efforts de traction à réaliser et de l'autre de l'intervalle de temps admis pour les rechargements ; ces deux facteurs influent sur la solution d'une façon assez complexe, par suite des exigences de l'entretien des accumulateurs.

La batterie doit, par suite des propriétés connues des accumulateurs, satisfaire à deux conditions distinctes :

[1] Le cas où la source mobile est une machine à vapeur ou à pétrole est assez peu pratique et a été suffisamment étudié à propos de la locomotive Heilmann pour que nous n'ayons pas à y revenir ici.

1° *Condition de débit.* — Elle doit d'abord pouvoir supporter sans danger de détérioration le courant maximum calculé comme précédemment (p. 645) dans le cas où la voiture aurait à démarrer sur la rampe la plus forte de la ligne à exploiter[1], en tenant compte de la vitesse fixée et du mode de groupement de la batterie réalisé par le régulateur au départ.

2° *Condition de capacité.* — En second lieu, la batterie doit pouvoir fournir sans décharge exagérée le parcours jugé nécessaire pour l'exploitation. Pour laisser une marge à l'imprévu, il est bon de supposer que la décharge sera arrêtée aux 3/4 de la capacité.

On remarquera, à cette occasion, que pour réaliser une capacité déterminée il faut une batterie de poids différent suivant que la décharge est plus ou

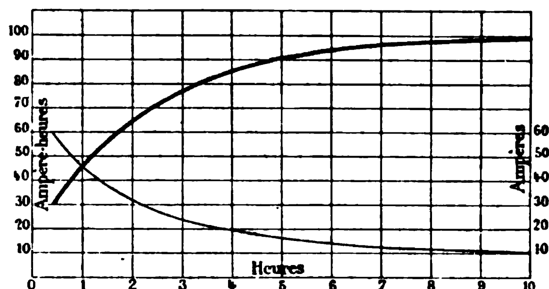


Fig. 878. — Courbe de capacité utilisable et de débit en fonction de la durée de la décharge d'une batterie.

Traits forts, capacités. — Traits fins, débits.

moins rapide, par suite de la notable diminution de rendement qu'occasionne l'emploi de régimes de plus en plus forcés.

La figure 878 représente, par exemple, pour un accumulateur Tudor[2] utilisé à courant constant après une charge complète toujours la même, l'intensité du courant I débité et la quantité d'électricité rendue Q, en fonction du temps de la décharge. Réciproquement, à chaque capacité en ampères-heures donnée par la courbe supérieure correspondent une durée de décharge indiquée en heures par l'abscisse et un débit moyen indiqué en ampères par la courbe inférieure. On voit que la capacité varie assez peu entre la décharge en 10 heures et la décharge en 5 heures, qu'elle s'abaisse à 65 p. 100 pour la

[1] On doit en pratique éviter d'arrêter la voiture sur une rampe de ce genre ; mais on est bien obligé de supposer qu'un pareil arrêt puisse se produire et de mettre la batterie en état d'assurer le démarrage dans ce cas.

[2] D'après une intéressante communication de M. Blanchon, *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, mars 1897.

décharge en 2 heures, à 45 p. 100 pour une heure et à 30 p. 100 pour une demi-heure.

Pour un élément du genre Faure, la courbe des capacités a une forme un peu différente, donnant des capacités un peu plus grandes aux régimes de décharge très lents, mais plutôt inférieures dans les décharges rapides [1].

L'élément qui présente pour une capacité donnée le poids le plus faible est celui qui réalise cette capacité sous le débit moyen fixé. L'accumulateur idéal devrait donner à la fois un débit élevé, un bon rendement et par suite une capacité élevée sous le plus faible poids possible ; mais ces desiderata sont jusqu'ici malheureusement incompatibles.

Sur un parcours très étendu en palier c'est la capacité qui fixe les dimensions des éléments, tandis que sur un parcours restreint ou très accidenté c'est la puissance qui intervient seule.

On a vu au chapitre précédent (p. 512) comment le poids mort des batteries limite l'emploi de la traction par accumulateurs aux lignes très peu accidentées (rampes ne dépassant pas 1 à 2 p. 100) ; lorsque des rampes plus fortes (2 à 4 p. 100) se présentent sur une faible longueur, on ne peut employer ce mode de traction qu'en réduisant suffisamment la vitesse sur ces rampes pour ne pas dépasser un certain débit.

Il y a le plus souvent dans la détermination du parcours et par suite de la capacité à imposer aux batteries un élément arbitraire ; en effet, les lignes desservies par accumulateurs sont généralement des voies urbaines assez courtes, où l'on est libre de recharger les batteries après un nombre plus ou moins grand d'allers et retours. Pour lever cette indétermination, il suffit de faire intervenir la *durée de charge*.

Autrefois la charge se faisait *à intensité constante* et à un régime de débit inférieur au régime moyen de décharge ; la charge devait donc durer un peu

[1] Ces courbes de capacité en quantité peuvent s'exprimer assez bien en général pour chaque type par une formule à trois coefficients de la forme

$$Q = It = A + Bt + \frac{C}{t}.$$

Pendant la décharge, la f. é. m. E de la batterie s'abaisse avec le temps; la *capacité en énergie* W définie par l'équation $W = \int e\,i\,dt$ semble être, d'après une remarque faite pour la première fois par M. Carl Hering, une simple fonction linéaire du temps, de la forme

$$W = A' + B't.$$

S'il en est bien ainsi, ce sont ces courbes d'énergie qu'on devrait tracer de préférence à celles des décharges en quantité.

plus longtemps que la décharge ; mais, par suite des arrêts, on pouvait charger à l'usine une batterie de rechange pour chaque voiture pendant le parcours de celle-ci.

Aujourd'hui on emploie exclusivement la charge *à potentiel constant*, infiniment plus commode et plus rapide : dans ce système, préconisé dès 1891 par M. Picou, le courant de charge atteint au début sans inconvénient des intensités 7 ou 8 fois plus grandes que le courant constant admis précédemment, tandis qu'à la fin de la charge les intensités deviennent plus faibles; grâce à la plus grande quantité de matières actives transformables au début qu'à la fin de la charge, ces régimes sont rationnels et sans inconvénient pratique.

MM. Tudor et Muller ont perfectionné plus récemment cette méthode, en remarquant que le temps le plus utilement employé pendant la charge, c'est le commencement de celle-ci, et qu'on peut par conséquent obtenir pour n'importe quel accumulateur une *charge rapide* en arrêtant celle-ci systématiquement aux deux tiers, par exemple, de la capacité normale ; la rapidité de cette charge partielle est limitée seulement par la densité de courant admissible, c'est-à-dire par le rapport de l'intensité à la surface active des électrodes.

Les appareils à pastilles ou du genre Faure ne se prêtent qu'à la charge lente, tandis que les appareils du type Planté peuvent être établis aujourd'hui en vue d'une rapidité quelconque, depuis plusieurs heures jusqu'à 5 minutes.

Divers modes d'exploitation possibles. — D'après ce qui précède, on a le choix entre deux modes d'exploitation très différents :

1° *Exploitation avec une batterie de rechange pour chaque voiture.* — On dispose pour charger les batteries d'un temps égal à celui des parcours, c'est-à-dire en général au moins 2 heures ; on peut donc employer le procédé de la charge lente à potentiel constant, qui donne le meilleur rendement et le poids minimum, que cette charge soit complète ou partielle.

2° *Exploitation avec des batteries à demeure sur les voitures.* — On est obligé de faire une charge rapide en 10 à 20 minutes aux stations d'arrêt, ce qui nécessite des batteries à grande surface, plus lourdes en général que les précédentes. Ces batteries peuvent servir aussi pour la *traction mixte* avec trôlet et batterie en parallèle sur les voitures, suivant le mode d'exploitation qui sera examiné plus loin.

Dans le premier type d'exploitation on sacrifie le débit à la capacité et à la légèreté ; on fait l'inverse dans le second.

Données d'expériences. — Nous allons donner quelques renseignements plus précis et quelques chiffres relatifs à ces deux systèmes.

1° *Accumulateurs à charge lente.* — On a employé successivement avec la première méthode le type à pastilles (*Laurent-Cély*, ou *Chloride*, etc.), le type à pâte rapportée (*Faure*, *Sarcia*, etc.) et enfin le type Planté modernisé (*Tudor*, *Dujardin*, *Blot*, etc.). Pour les premiers le régime moyen de décharge ne doit pas dépasser en général 2 amp. par kg. d'électrodes, ni le régime maximum 4 amp. exceptionnellement; la capacité correspondant au régime de 2 amp. par kg. d'électrodes est de 10 à 13 amp.-h. par kg. Dans le type Sarcia, beaucoup plus léger, on admet 4 amp. en régime moyen et 12 en régime forcé; ces régimes élevés ont permis de réduire sur les lignes de Paris-Saint-Denis le poids des batteries de 3 000 à 2 200 kg. (soit 0,15 au lieu de 0,20 du poids des voitures), mais ils nécessitent de fréquents réempâtages de plaques et l'on semble avoir éprouvé de ce côté quelques mécomptes. On préfère dans un type de voiture plus récent (système Johannet) prendre des batteries deux fois plus lourdes qui restent à demeure sur les voitures et demandent beaucoup moins d'entretien. Le type *Gülcher*, également très léger, ne permet pas les visites ni les réparations et ne doit pas être plus résistant à l'usage.

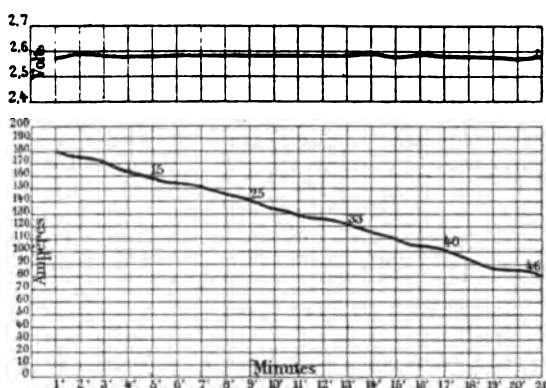


Fig. 879. — Courbes de charge d'un élément Tudor à charge rapide de 18 kg.

Avec les accumulateurs genre Planté on ne peut guère dépasser une capacité de 8 à 10 amp.-heures par kg. d'électrodes avec décharge en 3 heures; mais le débit peut atteindre momentanément 10 amp. par kg. d'électrodes.

Si l'on utilise toute la capacité, il faut 4 ou 5 heures pour charger ces batteries; on ne fait alors que 3 ou 4 charges par jour. C'est ainsi qu'on opérait jusqu'en 1897 sur les lignes de Saint-Denis à la Madeleine et à l'Opéra (rampe maxima 3,8 p. 100). Les voitures anciennes à 52 places pèsent 14 t., dont 7,5 pour la voiture, 3,5 pour les voyageurs et 3 pour les batteries; elles marchent à la vitesse de 16 km : h. hors Paris et 12 km : h. dans Paris. Les batteries de 108 éléments à 22 kg. d'électrodes, rechargées en 5 heures, suffisaient à 3 voyages aller et retour, soit 55 km. sans rechargement. Aujourd'hui on préfère les recharger toutes les 2 heures, après un seul parcours de 18,5 km., en n'utilisant que le tiers de leur capacité. On emploie de même les nouvelles bat-

teries de 2 200 kg., formées de 108 éléments à 17,5 kg. d'électrodes, dont on utilise seulement la demi-capacité. Ce changement de mode d'exploitation est une des meilleures preuves qu'en général on ne doit pas chercher à utiliser la capacité entière des batteries à charge lente et que leurs dimensions sont fixées surtout par le débit.

2° *Accumulateurs à charge partielle rapide.* — La courbe de la figure 879, qui donne les courbes de rechargement d'un élément Tudor 2002 des voitures à accumulateurs de la Compagnie des tramways de Paris et du département de la Seine (lignes de la Madeleine à Courbevoie et à Levallois), montre les résultats obtenus par la charge partielle rapide. Cet élément, qui pèse complet 18,1 kg. en ordre de marche, a une capacité normale de 60 amp.-heures, pour décharge en 1 heure (avec la charge en 10 heures, cette capacité serait à peu près double).

Chargé au potentiel constant d'environ 2,6 volts, il est soumis à un courant qui décroît de 180 amp. à 80 amp. au bout de 21 minutes; comme l'indiquent les chiffres ajoutés sur la courbe, il reçoit la fraction de charge suivante (rapportée aux 60 amp.-h.) :

En 5 min.,	15 amp.-h.	ou par rapport	à la décharge	en 1	heure	25	p. 100.
— 10 —,	25	—	—	—	—	41,7	—
— 13 —,	33	—	—	—	—	55,5	—
— 17 —,	40	—	—	—	—	66,6	—
— 21 —,	46	—	—	—	—	76,6	—

Suivant les conditions d'exploitation, on admet une durée de charge de 10 à 20 minutes; dans ces conditions, le débit de décharge est facilement maintenu au-dessous du débit de charge. Le poids de la batterie dépend donc seulement de la capacité nécessaire pour effectuer le parcours minimum.

Pour ne pas trop réduire le rendement des accumulateurs, qui croît avec la durée de la décharge, ni la durée journalière d'utilisation des voitures, qui diminue quand le nombre des rechargements augmente, il convient en général de ne pas réduire la durée du parcours normal au-dessous de 1 à 1,5 heure.

Comme les régimes maxima de charge admis sont proportionnels aux surfaces actives des plaques, ces accumulateurs ne peuvent présenter un poids acceptable qu'à condition d'être à grande surface. Les éléments *Tudor*, par exemple, admettent des régimes de 10 à 12 amp. par kg. d'électrodes avec 20 à 24 dm^2, soit 0,5 amp. par dm^2. Les accumulateurs *Blot*, qui présentent 30 à 35 dm^2 par kg. d'électrodes et ont des capacités de 10 amp.-h. par kg. au régime de 1 amp., pourraient supporter au même taux des régimes temporaires de 15 à 17 amp. par kg. de plaques; à la décharge, ils supportent des régimes prolongés de 5 à 6 amp. par kg. qui peuvent être momentanément portés à 10 ou 12 amp. et même au delà, tout en donnant des rendements satisfaisants.

Par exemple, M. Picou[1] a trouvé, en opérant la charge à 14-18 amp. par kg.

[1] *Notice de la Société des Accumulateurs Blot.*

de plaques et la décharge à 3,5 amp. par kg., un rendement de 0,97 en quantité et de 0,70 en énergie ; dans une autre expérience, que représente la figure 880 et où le débit de charge était de 300 amp. pour 8,5 kg. d'électrodes et le débit de décharge de 20 amp., une charge de 5 minutes a permis une décharge de près d'une heure avec un rendement de 0,89 en quantité et de 0,61 en énergie. Avec une charge en 15 minutes, le rendement en énergie est de 0,66 et la capacité utilisable en 2 heures de 4 à 5 amp.-h. par kg. On remarquera la constance du voltage à la décharge, provenant de la grande surface des électrodes (0,33 m² par kg. de plaques) et de la bonne circulation de l'électrolyte ; la valeur élevée de ce voltage est due probablement à l'électrolyse de l'acide sulfurique, employé à un titre élevé (densité, 1,285) dans ce genre d'application.

Grâce à ces conditions favorables, on voit que dans l'emploi des accumulateurs Planté à grande surface, chargés en 15 ou 20 minutes, on peut compter

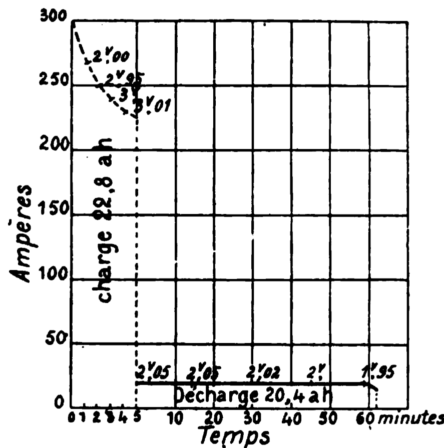


Fig. 880. — Courbe de décharge d'un accumulateur Blot après une charge rapide.

sur une charge utilisable de 4 à 5 amp.-h. au kg. d'électrodes avec un rendement moyen de 0,90 en quantité et de 0,65 en énergie. C'est là un résultat remarquable. Mais il ne faut pas perdre de vue que le même type d'accumulateur pourrait fournir au moins 10 amp.-h. [1] pour une décharge en 10 heures et 6 à 8 amp.-h. pour une décharge en 3 heures. L'accumulateur à charge rapide présente donc, *à charge utile égale*, un poids d'environ 50 p. 100 supérieur à l'accumulateur à charge lente. Mais, comme le parcours est plus réduit, les batteries ne sont pas nécessairement plus lourdes.

Chiffres pratiques. — On trouvera les données pratiques relatives aux accumulateurs de traction, en vue du calcul des batteries, résumées dans le tableau suivant, dont nous avons cherché à rendre

[1] Certains modèles spéciaux de M. Blot pour installations fixes atteignent même 14 à 15 amp.-heures.

les chiffres exempts de l'exagération qui a nui trop souvent aux partisans de ce genre de traction ; nous supposons un voltage de 1,9 volts à la décharge.

TYPE d'accumulateur.	MODE de charge.	DÉBIT par kg. d'électrodes en ampères		PUISSANCE DISPONIBLE à la décharge par kg. de poids total en watts		DURÉE de la décharge normale en heures.	ÉNERGIE UTILISABLE correspondante par kg. de poids total en watts-heures.	RENDEMENT MOYEN correspondant.
		normal.	temporaire.	prolongée.	temporaire.			
A grande capacité (Fulmen, etc.).	lente.	4	8	5	10	3-5	20-25	0,70
A oxyde rapporté (Faure, Laurent-Cély).	lente.	2,5	5-6	3-4	6-8	3-5	12-15	0,70
	demi-rapide.	2,5	5-6	3-4	6-8	3-4	8-10	0,60
Planté moderne.	lente ou demi-rapide.	3-4	6-8	4-5	8-10	3-4	10-12	0,70
	rapide.	4-5	8-10	4-6	8-12	1,5-3	4-5	0,65

Calcul de la batterie. — La connaissance des données empiriques qui précèdent suffit pour permettre de calculer la batterie nécessaire pour le service d'une ligne donnée.

On commence par choisir le système de charge (lente ou rapide), d'après les convenances spéciales et la durée du parcours aller et retour T, la vitesse moyenne étant donnée a priori et le poids de batterie proportionné à celui de la voiture d'après des exemples analogues. On détermine ensuite par les procédés indiqués plus haut (p. 640) la dépense d'énergie W [1] et le maximum de décharge I_m le long de ce parcours.

La capacité utilisable nécessaire en ampères-heures Q et le courant moyen de décharge I ont pour valeur, en appelant E la f. é. m. moyenne à la décharge :

$$Q = \frac{W}{E}; \qquad I = \frac{W}{ET}.$$

Connaissant d'après ce qui précède la capacité spécifique γ et le

[1] La dépense d'énergie diffère suivant qu'on pratique ou non la récupération ; nous supposons d'abord qu'on ne récupère pas.

débit maximum δ par kg. de plaques pour l'espèce d'accumulateurs employée, on en déduit deux valeurs du poids des plaques

$$P = \frac{I_m}{\delta},$$

$$P' = \frac{Q}{\gamma} = \frac{W}{E\gamma}.$$

On choisit la plus grande, tout en cherchant à la ramener, par une combinaison convenable, sensiblement au même chiffre que l'autre. Enfin, on s'assure que le courant *moyen* n'est pas trop élevé.

Si le poids ainsi trouvé diffère notablement de celui qu'on avait prévu au début du calcul, on rectifie ce dernier en conséquence. La batterie est ainsi déterminée par une méthode de fausse position. On corrige de même la capacité d'après la durée de décharge admise [1].

On peut éviter les tâtonnements en opérant par la méthode indiquée plus haut (chap. XIII) en fonction des poids et puissances spécifiques. On emploiera en particulier les formules de la page 512 en se donnant d'après les résultats connus les valeurs des constantes, ainsi que nous l'avons expliqué.

Il reste à choisir le type des éléments à employer. On peut, en effet, prendre, pour une puissance donnée, soit un grand nombre de petits éléments, soit un petit nombre de grands éléments.

L'emploi de bas voltages et, par suite, de gros éléments a l'avantage de réduire au minimum l'espace occupé par la batterie ; mais on est obligé alors de manier et de commuter des courants puissants, ce qui est gênant. Le mieux est de prendre un juste milieu.

Lorsque les batteries sont rechargées à l'usine même, l'usage est aujourd'hui de prendre des batteries de 100 à 150 volts. On est allé à 200 volts dans le système des couplages multiples; mais, si l'on abandonne les quatre groupes au profit d'un ou deux seulement, 100 volts sont bien suffisants : c'est ainsi que la Société pour le Travail électrique des Métaux a remplacé ses anciennes batteries de 108 accumulateurs par des batteries de 56.

Il ne semble pas désirable de descendre plus bas, à moins qu'on ne s'y trouve conduit plus tard par l'emploi d'accumulateurs à faible voltage, analogues

[1] Dans ce but, on peut appliquer les formules données plus haut (p. 665, en note) ; mais, quoi qu'on fasse, l'évaluation du rendement ne peut être précise, car ces formules s'appliquent à des décharges à intensité constante, ce qui n'est pas le cas sur un véhicule. L'expérience permettra de faire ensuite les corrections nécessaires.

à ceux de Waddel Entz. Il y a, au contraire, avantage à monter jusqu'à 500 volts à la charge lorsqu'on veut utiliser avec des accumulateurs une voiture à trôlet dont les moteurs sont établis pour 500 volts; tel est le cas des voitures à traction mixte employées dans diverses installations de tramways, notamment à Hanovre, à Dresde, à Paris, sur lesquelles on emploie 200 éléments chargés à 500 volts et qui ne donnent à la décharge que 360 à 400 volts.

Exemple numérique. — Appliquons les considérations précédentes à un exemple numérique, celui d'une ligne urbaine de 4,5 km. de longueur présentant une rampe moyenne (effet des courbes compris) de 0,003 et une rampe maxima de 0,035; supposons cette ligne desservie par des automobiles pesant en charge totale 14 t. (16,5 t. avec l'inertie), dont 4,5 pour la batterie et les moteurs, équipées avec 2 moteurs série du type défini par les courbes de la figure 568 (p. 155) et pouvant éventuellement remorquer une voiture d'attelage de 7 t. (7,25 t. avec l'inertie). Au lieu de 500 volts on prendra comme tension normale aux bornes 250 volts, de façon à limiter à 11 km : h. environ la vitesse obtenue avec le groupement des moteurs en parallèle. Soit 750 kg. l'effort moteur maximum de l'équipement, qu'on pourra porter exceptionnellement à 900 kg. On peut effectuer le calcul comme il suit :

	Automobile seule.	Automobile avec voiture d'attelage.
Effort résistant en palier, à 10 et 7 kg : t. .	140 kg.	189 kg.
— — sur la rampe moyenne. . .	182 —	252 —
— — sur la rampe maxima . . .	630 —	735 —
Vitesse sur la rampe maxima, d'après l'épure.	7 km : h.	7 km : h.
Effort accélérateur moyen disponible en palier . . . . 750 — 140 =	610 kg.	750 — 189 = 561 kg.
Accélération moyenne. . . . $\frac{610}{102} \times n =$	1,31 km : h : s.	0,96 km : h : s.
Durée moyenne de mise en vitesse en palier	8,4 sec.	11,4 sec.
Effort accélérateur sur la rampe maxima de 0,035	750 — 630 = 120 kg.	900 — 735 = 165 kg.
Accélération sur la rampe maxima	0,257 km : h : s.	0,245 km : h : s.
Durée de mise en vitesse sur cette rampe.	27,2 sec.	28,75 sec.
Nombre d'arrêts, à raison de 3 par km. .	27	27
Énergie consommée pour la traction sur le parcours (avec $\eta = 0,73$) $W = \frac{9 \times 182 \times 9,81}{3,6\ \eta} =$	6 115 w.-h.	8 466 w.-h.
Énergie supplémentaire pour les démarrages . . . . $W' = \frac{nP'V^2}{30} =$	1 887 —	2 586 —
Énergie totale. . . . . $W + W' =$	8 006 —	11 052 —
Consommation par voiture-kilomètre. . .	889,5 —	1 228 —
Puissance moyenne correspondante. . . .	9 784 w.	13 508 w.
Poids de batterie correspondant (à 4 w. par kg.)	2 446 kg.	3 377 kg.

	Automobile seule.	Automobile avec voiture d'attelage.
Puissance sur la rampe maxima.	17 800 w.	20 770 w.
Puissance moyenne au démarrage (moyen) . . . . $\frac{F_{max} \times 9{,}81}{0{,}50 \times 2 \times 3{,}6} =$	22 481 —	26 782 —
Poids de batterie correspondant (à 8 w. par kg.)	2 810 kg.	3 350 kg.
Nombre de voyages possibles.	2	1
Nombre d'éléments . . . . $\frac{250}{1{,}9} =$	140	140

Le poids de batterie prévu d'abord est donc un peu faible pour un train complet ; mais le calcul peut être conservé tel quel sans qu'une seconde approximation soit nécessaire. Dans le cas de la remorque, le poids des moteurs doit être estimé à 1 000 kg. pour chacun d'eux.

On arriverait à des résultats analogues par la méthode des poids spécifiques exposée plus haut (p. 512). Il faut remarquer seulement que, le voltage étant réduit à 250 volts au lieu de 500, le poids spécifique par unité de courant et d'effort doit être réduit de moitié. On prendra, en acceptant un régime forcé de 5 amp. par kg. de batterie, $q_2 = \frac{140}{10 \times 5} = 2{,}8$ kg. de batterie par kg. d'effort à la jante. D'où, en se rappelant que chaque moteur pèse 1 000 kg. et développe un effort maximum de 375 kg.,

$$q = q_1 + q_2 = \frac{2\,000}{750} + 2{,}8 = 5{,}5 \text{ kg.},$$

$$f = \frac{750}{14\,000} = 0{,}0538,$$

dans le cas d'une automobile seule.

La rampe maxima étant de 0,035, le rapport x du poids de la batterie à celui du véhicule sera donné par l'équation

$$0{,}010 + 0{,}035 = \frac{x}{5{,}5},$$

d'où

$$x = 0{,}25,$$

c'est-à-dire que la batterie et les moteurs devront peser ensemble 1/4 du poids du train en charge, soit $\frac{14 + 7}{4} = 5{,}25$ t. ; il reste ainsi 3,25 t. pour la batterie, chiffre peu différent du précédent.

Puissance et énergie dépensées à l'usine. — L'énergie consommée à l'usine se déduit de celle que dépensent les voitures en tenant compte de la perte occasionnée par les accumulateurs et, s'il y a lieu, par les lignes de charge, lorsqu'il s'agit de charge à distance (système de Paris-Courbevoie ou de Hanovre).

Système de la charge à l'usine. — Lorsque la charge se fait à l'usine, le nombre des batteries se trouvant à la fois en rechargement est toujours assez grand pour que la charge totale des machines génératrices (moteurs à vapeur et dynamos) varie peu ; ces machines se trouvent ainsi dans les meilleures conditions et peuvent travailler à leur rendement maximum, soit 0,80 environ. La décharge des batteries est, d'autre part, assez lente pour leur donner un rendement en énergie de 0,70. En outre, si les régulateurs permettent d'abaisser le voltage aux mises en marche et qu'on pratique la récupération aux descentes (voir § 5), le rendement moyen des voitures, démarrages compris, sur une ligne de tramway urbaine peut s'élever à 0,65 ou 0,70, au lieu de 0,60. On pourra donc atteindre au maximum pour tout le système, entre la jante des roues et les cylindres des machines, un rendement global moyen de

$$0{,}65 \text{ à } 0{,}70 \times 0{,}70 \times 0{,}80 = 0{,}364 \text{ à } 0{,}392,$$

soit en nombres ronds 0,35 à 0,40[1].

La puissance à fournir en watts par les machines de l'usine se déduit de ce rendement η, du nombre de départs par heure n, de la durée d'un parcours en heures T et de l'énergie consommée par chaque voyage aller et retour en watts-heures W. En écrivant, en effet, que la puissance à fournir est égale à celle que consomment toutes les voitures en service simultané, majorée dans le rapport inverse du rendement, on a

$$P = \frac{nW}{\eta T}.$$

On doit établir les dynamos de façon à pouvoir fournir cette puissance sous une f. é. m. de charge de 2,4 volts par élément, en se réservant la possibilité de monter jusqu'à 2,7 volts à la fin de la charge si c'est nécessaire. A Saint-Denis, on emploie dans ce but un survolteur élevant la tension du courant pris au tableau.

[1] En fait, dans les installations existantes, ce rendement est beaucoup plus bas : dans celle de Saint-Denis, les ensembles générateurs démodés n'ont qu'un rendement moyen de 0,65 et le rendement moyen des moteurs et régulateurs réunis est inférieur à 0,65 ; sur les nouvelles voitures du même réseau, qui sont munies de moteurs plus perfectionnés, l'amélioration de rendement est compensée par une régulation moins économique au démarrage ; tout compte fait, on ne dépasse probablement pas 0,30 de rendement total dans cette installation.

Système de la charge en des postes fixes extérieurs à l'usine. — La puissance demandée aux machines n'est plus aussi bien égalisée dans le cas de la charge hors de l'usine. La durée de la charge est alors sensiblement égale à l'intervalle des départs; il n'y a donc en chargement pour chaque ligne qu'une voiture à la fois, et la puissance varie dans une assez forte proportion entre le commencement et la fin, de sorte que, pour une même charge, il faut forcer le débit au début. Si l'on pouvait charger à la fois plusieurs voitures en nombre toujours constant, ces inégalités se compenseraient; mais il est pratiquement impossible de réaliser un horaire fixe et l'on doit se réserver, par conséquent, la possibilité de recharger à la fois un nombre variable de voitures ; le maximum atteint 4, par exemple, sur les lignes de la Madeleine à Courbevoie et à Levallois. On est donc forcé de donner aux machines une puissance supérieure à la puissance moyenne nécessaire indiquée par la formule

$$P = \frac{nW}{\eta_1 \eta_1' T},$$

en appelant η_1' le rendement des feeders entre l'usine et le point de charge. Dans l'installation qui vient d'être citée, $\eta_1' = 0,88$ à $0,90$; la puissance moyenne est d'environ 160 chev. et la puissance maxima de 200 ; la consommation d'énergie à l'usine est de 55 à 60 watts-heures par tonne-km., contre 40 w.-h. à la voiture.

II. — Traction par alimentation directe.

Oscillations de la puissance totale. — Le calcul du courant total consommé, lorsqu'on alimente directement les voitures par une canalisation soit aérienne (systèmes à fil aérien), soit souterraine (systèmes à caniveau), soit à niveau (systèmes à contact superficiel continu ou sectionné), est beaucoup moins facile que dans le cas précédent, car rien ne vient plus régulariser la puissance consommée par chaque voiture, et toutes les variations du courant des divers véhicules à chaque instant du parcours se font ainsi sentir à l'usine génératrice. Il en résulte dans le débit total des *oscillations* continuelles et très rapides, dont l'amplitude est surtout grande au moment des démarrages.

Les courbes qu'on relève à l'usine au moyen de l'ampèremètre enregistreur, et dont les figures 881 et 882 montrent des exemples, fournissent une indication exacte de ces oscillations, à condition que l'instrument présente la rapidité et l'apériodicité nécessaires, suivant les principes posés plus haut (p. 388); les courbes relevées à vue au moyen de lectures intermittentes qu'on trouve dans beaucoup de publications, surtout en Amérique, n'en donnent qu'une idée très fausse et en dénaturent complètement le caractère.

Qu'il s'agisse d'une grande ou d'une petite station, ces oscillations conservent le même aspect général : les fluctuations sont d'autant moins nombreuses, mais leur amplitude relative (c'est-à-dire comparée à la charge moyenne) est d'autant plus accentuée que les déclivités sont plus fortes et les

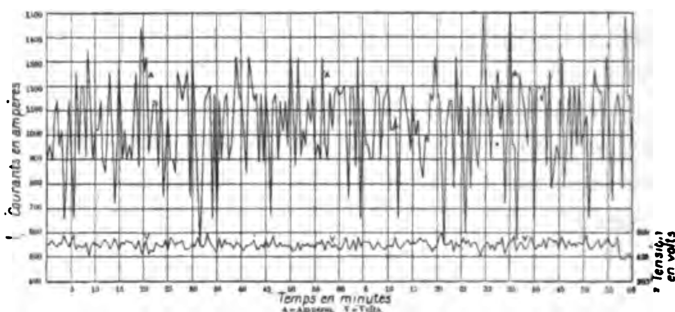


Fig. 881. — Courbes de variation du débit et du voltage à l'usine génératrice du chemin de fer aérien de Liverpool.

voitures en service moins nombreuses (ce qui accroît l'importance relative des démarrages individuels). L'augmentation du nombre des voitures tend naturellement à établir une certaine compensation entre l'excès de consommation des unes et la diminution ou la suppression du courant sur les autres au même moment, et accroît ainsi le rapport entre la charge moyenne et la charge maxima de l'usine à l'époque considérée. Ce rapport ou « coefficient de charge », qui tombe à 0,20 dans les très petites exploitations, peut s'élever dans les grandes à 0,60 et plus.

Calcul de la puissance totale consommée par les voitures. — Dans un projet de traction, l'évaluation de l'amplitude des fluctuations du courant total et, par suite, le calcul du courant maximum nécessaire (sous un voltage moyen donné) sont un problème à peu près impossible à résoudre avec quelque précision. On peut seulement indiquer des procédés de calcul approximatifs, qui consistent soit dans la détermination d'un graphique de courant total, soit dans une application plus ou moins discutable du calcul des probabilités.

Méthode du graphique du courant total. — Supposons que, par

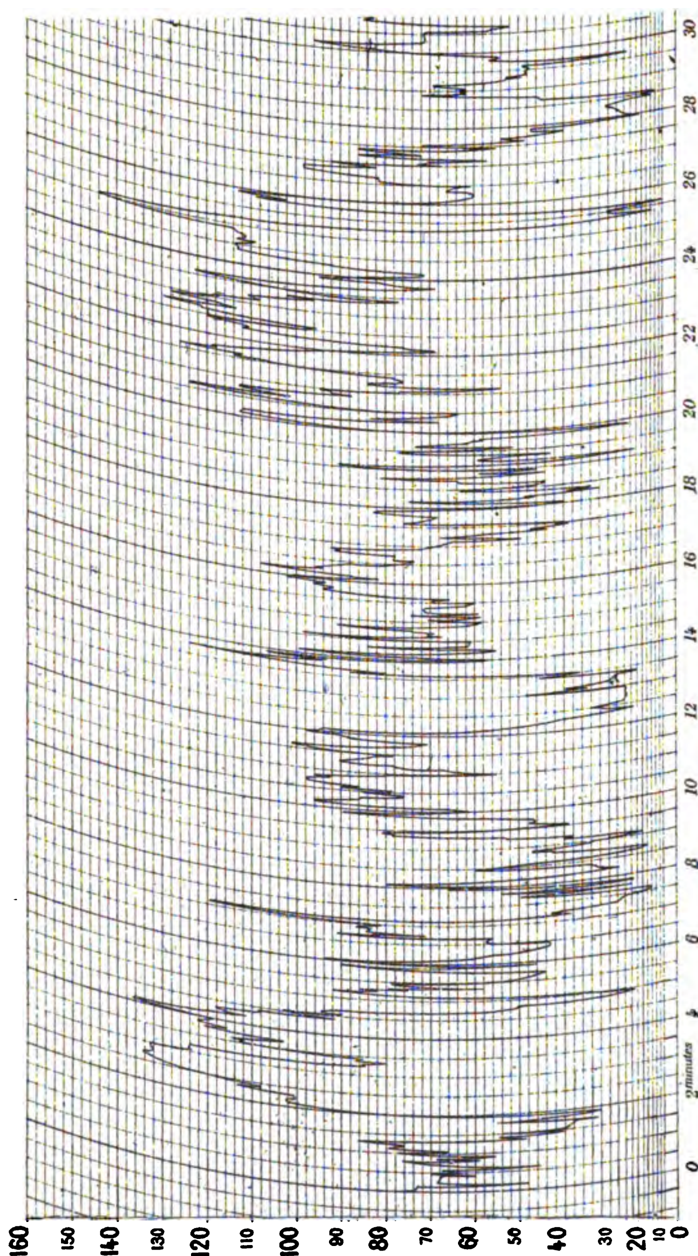


Fig 882. — Spécimen de diagramme d'ampèremètre enregistreur du tramway de Marseille, avec 8 voitures en service.

les procédés indiqués avec détails au § 2 (p. 612), on ait dressé

le graphique de marche en fonction du temps pour un véhicule ou un train isolé effectuant un parcours complet aller et retour sur

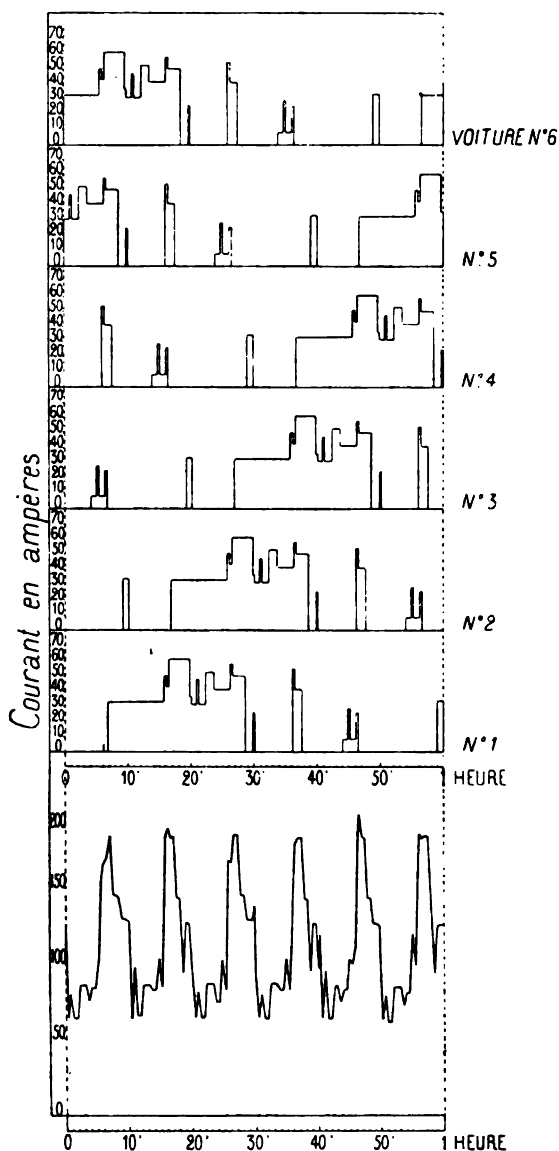


Fig. 883. — Principe de la construction du graphique du courant total.

une ligne, en tenant compte des arrêts tels qu'ils sont fixés par l'horaire, s'il s'agit d'un service à arrêts fixes, ou prévus d'après les

probabilités dans le cas contraire. Supposons aussi qu'on connaisse l'horaire *moyen* du service, représenté par un graphique de marche simplifié (arrêts non représentés), tel que celui de la figure 858 (p. 602) qui nous servira d'exemple.

En général, la durée du parcours d'un train est un multiple exact, le m-tuple, par exemple, de l'intervalle de temps t qui sépare les départs ; il y aura donc à la fois sur la ligne m voitures ou trains donnant lieu à des combinaisons de courant périodiques, dont la période est précisément t. Pour avoir les variations du courant total en fonction du temps, il suffira de faire la somme des m courants pendant les divers moments de cette période. Ce travail se fera graphiquement en divisant le graphique en m tronçons de longueur égale qu'on placera les uns au-dessus des autres, comme le montre la figure 883, et en additionnant les ordonnées. La courbe obtenue par sommation représente les variations totales, dont la période est égale à la durée de l'intervalle entre les trains.

Dans l'exemple de la figure 883, qui s'applique à un tramway urbain européen, le trajet est de 4 km. ; le parcours aller et retour, arrêts compris, dure 1 heure ; sur ce temps, 10 minutes sont employées en battements de 5 minutes à chaque station extrême ; la vitesse *commerciale* est donc

$$\frac{8 \text{ km.}}{\frac{5}{6} \text{ heure}} = 9{,}6 \text{ km : h.}$$

La fréquence des départs étant de 10 minutes, il y a 6 voitures à la fois sur la ligne, ce qui fait 6 graphiques à superposer. Au bout de 10 minutes, chaque voiture ayant pris la place de la précédente, la courbe totale se reproduit identiquement à elle-même.

On obtient ainsi la courbe du bas de la figure 883, qui représente les variations du débit à fournir par les génératrices et d'où l'on peut déduire le débit moyen nécessaire *à l'heure du jour considérée*.

Les petites différences visibles entre les portions de courbe qui devraient se reproduire toutes les 10 minutes tiennent aux erreurs inévitables d'addition des graphiques ; nous les avons laissé subsister pour montrer que ces erreurs sont toujours faibles et qu'on peut par suite se contenter de faire l'addition pendant une seule période.

Application au projet de métropolitain de la page 627. — Comme application de cette méthode, nous donnerons ici la fin du projet de traction sur un métropolitain étudié à la page 627, et dont la première partie a consisté dans la détermination des conditions de parcours d'un train à l'aller et au retour.

Supposons, pour rendre le problème plus intéressant, qu'il s'agisse d'un service intensif avec départs toutes les 3 minutes. Il est avantageux, pour

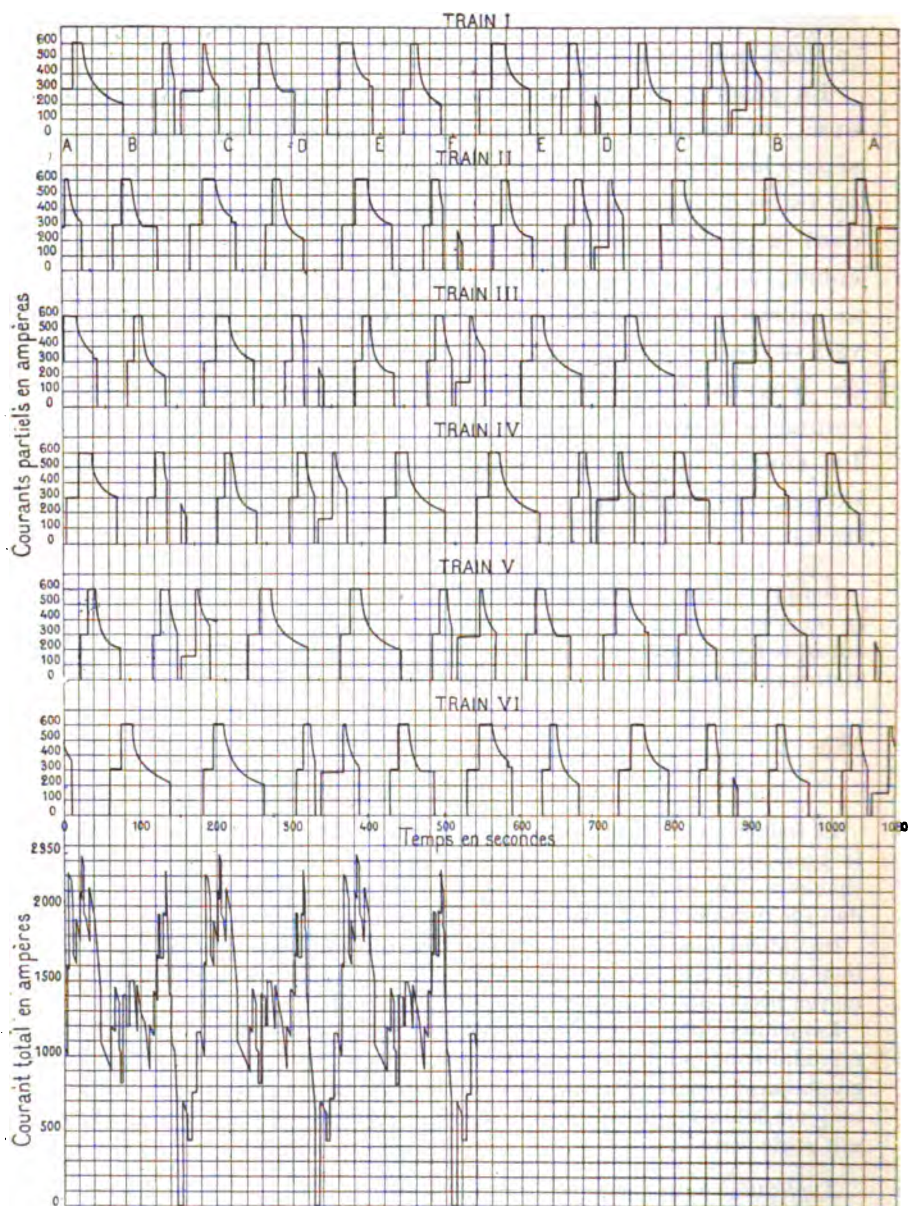


Fig. 884. — Graphique total des courants en fonction du temps sur la ligne de métropolitain étudiée plus haut (p. 627) dans l'hypothèse de trains se succédant de 3 en 3 minutes.

la commodité de l'horaire et du calcul, de supposer que les départs des deux stations terminus ont lieu en même temps; peu importe la durée des battements aux dites stations. On aura dans ces conditions 7 voitures à la fois sur la ligne, et les combinaisons de courants se reproduiront toutes les 3 minutes.

Le graphique du courant total s'obtiendra en portant bout à bout les deux courbes de courant en fonction du temps des figures 871 et 872, en faisant commencer le trajet de retour 9 minutes juste après le trajet d'aller. En décalant de 3, 6, 9, 12 et 15 minutes la courbe d'aller et retour ainsi tracée, on obtient les 6 courbes correspondant aux 6 trains de la ligne (fig. 884), et il suffit de faire la sommation des ordonnées pour obtenir la courbe résultante du courant de l'ensemble. Cette courbe montre que l'usine devra fournir un courant moyen de 1 300 amp. et un courant vrai variant entre zéro et 2 350 amp.; ce dernier chiffre peut être considéré sans crainte comme un maximum, car il correspond justement au démarrage simultané de 4 voitures sur 6; s'il en avait été autrement, on aurait dû faire un calcul spécial dans l'hypothèse de 3 voitures au moins démarrant simultanément.

La puissance totale maxima consommée sur la ligne, supposée toujours alimentée à 500 volts[1], est ainsi de

$$500 \text{ volts} \times 2\,350 \text{ amp.} = 1\,175 \text{ kilowatts},$$

ce qui, en admettant une perte en ligne de 10 p. 100, correspond à une puissance à la station de

$$550 \text{ volts} \times 2\,350 \text{ amp.} = 1\,292 \text{ kilowatts} = 1\,756 \text{ chev.}$$

La puissance effective à donner aux machines à vapeur s'en déduit comme on le verra plus loin; les barêmes de la page 692 indiquent, par exemple, qu'on devra employer 4 unités de 600 chevaux, dont une de réserve.

Cas des tramways. — En pratique, sur les tramways l'élasticité des horaires et l'irrégularité des arrêts enlèvent à cette méthode presque toute précision, en même temps que le grand nombre des véhicules répartis sur la ligne la rend excessivement laborieuse. On peut cependant la simplifier en traitant à part les démarrages; on calcule d'abord le graphique total relatif à des parcours *sans arrêt;* puis on ajoute au plus haut point de la courbe le courant supplémentaire maximum qu'on puisse prévoir du fait des démarrages simultanés, dont on apprécie le nombre au sentiment.

Par exemple, sur une ligne où il n'y a que 2 à 5 voitures, on supposera que 2 d'entre elles démarrent à la fois ; sur une ligne

[1] En réalité, sur un métropolitain ce chiffre de 500 volts sera souvent dépassé; on peut aller sans grand inconvénient jusqu'à 800 volts sur les chemins de fer.

de 6 à 8 voitures, on en supposera 3 démarrant simultanément, sur une ligne de 9 à 16 voitures, 4, et au delà, le quart du nombre total; comme on tient déjà compte des rampes dans le graphique de parcours, on supposera tous ces démarrages effectués en palier.

Méthode de la loi des erreurs. — Le calcul des probabilités ne semble pas pouvoir trouver ici d'application, car les arrêts ne sont pas répartis uniformément sur toute la ligne et ne suivent pas de loi régulière. On peut cependant essayer d'appliquer la loi des erreurs sous une forme différente, comme l'a indiqué M. Max Corsepius[1], à qui nous laissons la responsabilité de sa méthode.

On détermine, par exemple, par le calcul, pour un certain nombre d'instants dans une période de la journée où le trafic reste constant, la somme des puissances ou des courants consommés par les voitures en circulation, en tenant compte de toutes les causes qui influent sur cette consommation (arrêts, démarrages, courbes, rampes, etc.). On obtient ainsi une série de valeurs fort différentes, dont la plus grande représente la puissance minima que les machines motrices doivent être capables de fournir pendant la période considérée. Soit, d'autre part, P_m la valeur moyenne de la puissance déterminée au moyen des diagrammes d'efforts. On admet que les écarts Δ entre cette valeur moyenne et les valeurs de la puissance calculées à différents instants sont assez irréguliers pour qu'on puisse les assimiler aux erreurs Δ commises dans l'observation d'un phénomène naturel et leur appliquer de même la méthode des moindres carrés.

Soient donc m le nombre des observations et n celui des constantes dans l'équation de dépendance qui définit le phénomène; on sait que la valeur la plus probable de l'erreur probable est

$$0{,}674\sqrt{\frac{\Sigma\,(\Delta^2)}{m-n}}\,.$$

Dans le cas actuel, cette expression représentera l'écart probable entre la puissance la plus grande qui ait chance de se produire et la puissance moyenne. La valeur de la puissance maxima probable sera alors donnée par la relation

$$M = \left(0{,}674\sqrt{\frac{\Sigma\,(\Delta^2)}{m-1}} + P_m\right)q,$$

en faisant $n = 1$ et appelant q le nombre de voitures simultanément en circulation (déduction faite des voitures en stationnement aux extrémités de la ligne).

On peut encore procéder d'une autre manière. Soient P_m la moyenne des valeurs de la puissance déterminées pour une série d'instants et δ les différences entre ces valeurs et P_m. Il pourra éventuellement se produire des différences plus grandes. Nous admettrons que les valeurs du courant qui ne

[1] *Sammlung Elektrotechnische Vorträge*, 1896, Heft 2.

durent pas au moins 1 minute n'ont pas d'intérêt au point de vue de la détermination de la puissance des machines, grâce à la faculté que possèdent celles-ci de pouvoir être momentanément surchargées sans inconvénient ; il en résulte que, si nous considérons un service de 10 minutes par exemple, le courant pourra prendre ces valeurs maxima pendant 1/10 seulement de ce temps. L'écart probable entre les puissances calculées et leur moyenne aura pour valeur la plus probable

$$0{,}674\sqrt{\frac{\Sigma(\delta^2)}{m}}.$$

Le calcul des probabilités enseigne de plus que la probabilité pour qu'un écart ne dépasse pas 2,5 fois, par exemple, l'écart probable est de 0,90. Mais nous venons de voir qu'avec un service de 10 minutes, l'écart maximum pouvait se produire pendant 1/10 seulement du temps total ; on en déduit que, selon toute probabilité, pendant 9/10 au moins de ce temps, l'écart ne dépassera pas 2,5 fois l'écart probable, c'est-à-dire que, en faisant $\alpha = 2{,}5$,

$$M = \left(0{,}674\sqrt{\frac{\Sigma(\delta^2)}{m}}\,\alpha + P\right).$$

De même, la probabilité pour qu'un écart ne dépasse pas 2,9 fois l'écart probable est de 0,95, ce qui correspond à un service de 20 minutes. On devra donc prendre pour α les valeurs 1,9, 2,5, 2,7 ou 2,9, suivant que le service sera de 5, 10, 15 ou 20 minutes ; pour chaque valeur de α, M s'obtiendra par l'équation précédente.

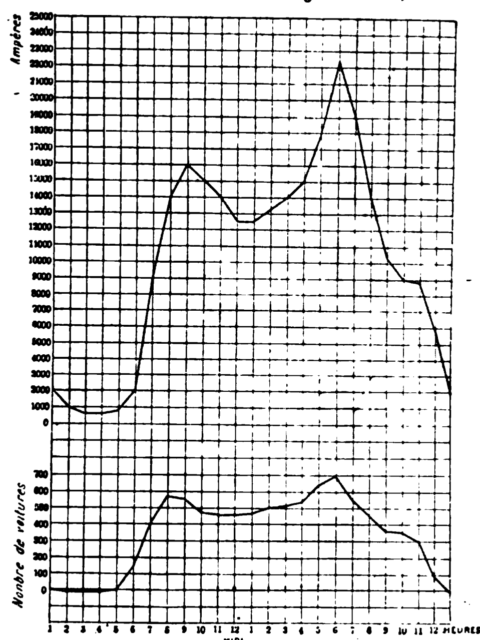
De toutes façons, les résultats obtenus ne peuvent être que très approximatifs, étant donné que l'horaire est toujours plus ou moins inexactement observé, que le nombre des voyageurs transportés varie constamment en cours de route, que l'effort de traction change suivant l'état de la voie aux différents points du parcours et les conditions atmosphériques, que la consommation de courant dépend essentiellement de l'habileté plus ou moins grande du mécanicien à se servir du régulateur et des freins, enfin que le rendement des différentes parties de la transmission varie lui-même avec la quantité d'énergie transmise.

Influence de la variation du trafic sur la puissance totale consommée par les voitures. — Dans ce qui précéde, nous n'avons raisonné, pour simplifier l'exposé, que sur une période du service où le trafic est régulier. En fait, il faut tenir compte en outre, pour l'évaluation de la puissance de l'usine, des variations du trafic aux

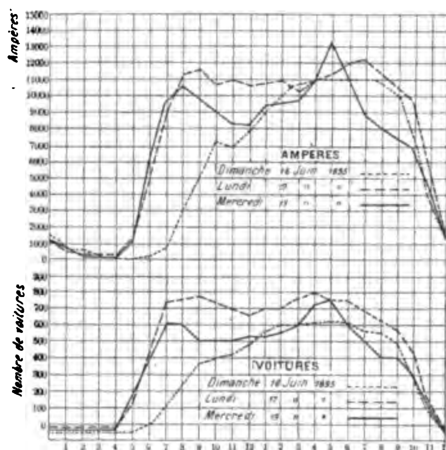
diverses heures de la journée, ainsi que des différences qui se produisent suivant les jours de la semaine et les époques de l'année. On ne peut le faire qu'approximativement, en traçant les courbes de trafic moyen d'après les résultats d'expérience d'exploitations analogues. Sans vouloir discuter ici en détail cette question, nous dirons seulement qu'en général il se produit sur les réseaux urbains deux *pics* ou maxima, correspondant aux heures d'entrée et de sortie des bureaux, ateliers et magasins[1] ; le dimanche, le trafic est en général plus intense sur les lignes de banlieue, plus faible sur les lignes intérieures des villes ; en hiver, les voyageurs sont aussi plus nombreux qu'en été.

Les figures 885 et 886 donnent deux exemples de ces courbes expérimentales, l'une relative aux tramways de Boston, l'autre au Metropolitan Elevated de Chicago.

Mais ce ne sont que des exemples locaux et il faudrait se garder de vouloir appliquer les mêmes formes de graphiques à des réseaux situés dans



Hiver ; temps de neige ; toutes voitures fermées, dont moitié à bogies.



Été : 95 p. 100 de voitures ouvertes.

Fig. 885. — Courbes de charge diurne relevées sur les tramways de Boston.

[1] A ce point de vue, l'allure des courbes de charge diurne d'un réseau de tramway

des contrées différentes : les conditions de vie des habitants, qui déterminent l'heure et l'importance relative des maxima, sont, en effet, éminemment variables avec le climat, les mœurs et les habitudes de chaque pays et même de chaque région.

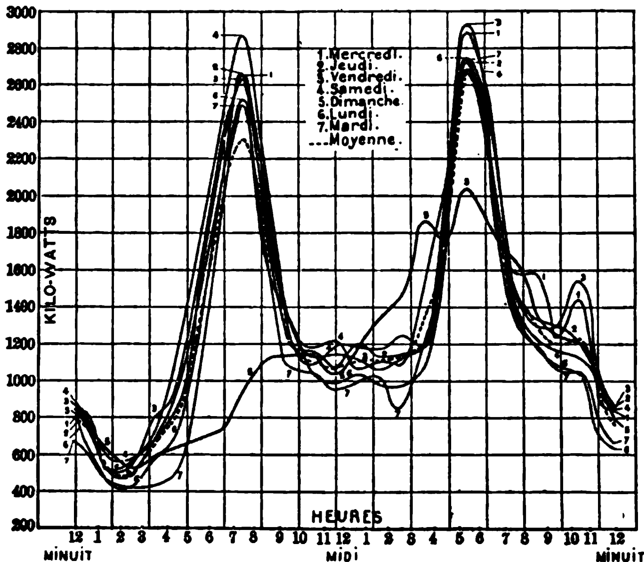


Fig. 886. — Variations de charge diurne à l'usine du Metropolitan Elevated de Chicago.

Rendement général de l'installation et puissance à l'usine. —

Une fois qu'on connaît le courant total consommé par les voitures et la tension moyenne, ainsi que le courant maximum, on a les éléments suffisants pour effectuer le calcul du réseau et des machines génératrices. C'est là une étude qui sort du cadre du présent ouvrage et sur laquelle nous ne donnerons par conséquent qu'une indication d'ensemble tout à fait sommaire.

Le calcul du réseau se fait suivant les principes généraux applicables à toute distribution, c'est-à-dire en cherchant d'une part à ne pas dépasser entre l'usine et le point le plus défavorable la chute de voltage maxima compatible avec le bon fonctionnement des

est toute différente de celles des stations d'éclairage, qui présentent un seul pic beaucoup plus accentué le soir. La courbe des réseaux de traction est plus avantageuse et se prêterait à une meilleure utilisation s'il n'y avait à faire face aux fortes oscillations momentanées signalées ci-dessus.

moteurs, et d'autre part à réduire au minimum la portion des dépenses totales d'exploitation afférente aux frais d'entretien et d'amortissement des installations fixes et à la consommation d'énergie par effet Joule dans la canalisation.

Mais les déplacements des voitures compliquent beaucoup les détails de cette application, surtout dans les réseaux maillés, et l'on est forcé de se contenter en général de vérifier que la chute de potentiel n'est pas exagérée. Le calcul se fait en répartissant les voitures sur les diverses lignes dans les positions les plus défavorables qu'on puisse prévoir d'après l'horaire et en calculant les courants dans les divers tronçons d'après les règles de Kirchhoff ; connaissant le courant I dans chaque tronçon et la section de celui-ci, on en déduit la perte de voltage u par la loi d'Ohm, qu'on peut mettre sous la forme

$$u = \rho l \Delta$$

où ρ est la résistance spécifique du conducteur, l sa longueur et Δ la densité du courant. On calcule de même les *feeders* qui alimentent le réseau de distribution depuis l'usine.

La limite de chute moyenne admise est en général de 10 p. 100, dont 9 p. 100 dans les lignes aériennes et 1 p. 100 dans les rails lorsqu'ils servent au retour du courant. Cette règle empirique donne des résultats satisfaisants et le ralentissement de 10 p. 100 qui peut en résulter pour les voitures est pratiquement insensible. Sur bien des réseaux, la chute dans les lignes aériennes atteint 15 p. 100 et même souvent en Amérique 20 ou 25 p. 100 ; mais, dans ce qui suit, nous admettrons la proportion de 10 p. 100. Sur le réseau de retour, dont les mailles sont formées par les rails convenablement éclissés, on peut admettre une chute de potentiel égale au 1/10 de celle du réseau de distribution [1].

La perte dans les feeders peut être de 5 p. 100 et même souvent plus élevée, pourvu que la tension sur le réseau soit suffisamment uniforme.

La puissance moyenne nécessaire aux bornes des génératrices

[1] Pour plus de détails, voir A. Potier, Retour par les rails, *Bulletin de la Société des Électriciens*, 1896, et A. Blondel, Distribution du courant de retour dans les tramways, *Éclairage Électrique*, 18 juillet 1896.

sera donc égale au produit du courant total des voitures par la tension normale majorée de 10 p. 100. Dans le cas où l'on emploie des courants alternatifs distribués par sous-stations à convertisseurs rotatifs, on peut admettre une perte de 3 à 5 p. 100 dans les transformateurs et de 8 à 10 p. 100 dans les convertisseurs, soit en tout 12 à 15 p. 100 ; cette perte s'ajoute à celle des lignes, qui peut être plus réduite dans ce cas grâce à l'emploi des hautes tensions sur le réseau primaire.

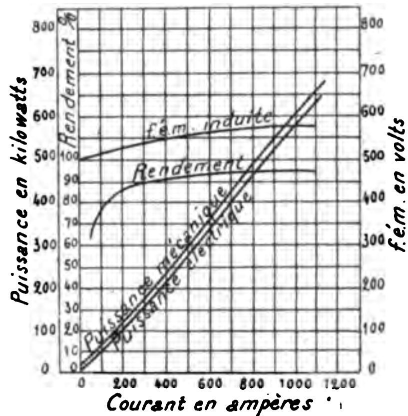


Fig. 887. — Rendement et f. é. m. induite en fonction de la charge d'une génératrice de la General Electric Co.

Les génératrices que l'on construit actuellement pour les tramways sont bien plus économiques que les anciens types ; on les combine en particulier spécialement de façon que leur rendement reste à peu près constant dans de très larges limites de charge et on les surcompounde pour leur faire donner à pleine charge 550 à 580 volts au lieu de 500 à vide. On en voit un exemple sur la figure 887, qui indique en même temps le rendement et le compoundage d'une dynamo de la General Electric Co.

Le tableau de la page 688, emprunté à un catalogue américain, indique les rendements réalisables avec des dynamos de diverses grandeurs, en même temps que leurs dimensions d'encombrement.

Dans les installations moyennes, une bonne dynamo doit pouvoir fournir des rendements de :

0,85 à 1/4 de charge,
0,90 à 1/2 —
0,92 à pleine —
0,90 à 25 p. 100 de surcharge.

Le rendement *moyen* journalier peut, dans ces conditions, atteindre, malgré les variations de charge, 0,85 à 0,90 et même 0,92 dans les grandes stations.

On en déduit la puissance sur l'arbre à fournir par les moteurs à vapeur.

Ces derniers, s'ils sont bien choisis, peuvent présenter des rendements analogues ; on sait, en effet, que les pertes, égales à la dépense de marche à vide, varient de 0,10 pour les grosses machines à 0,20 pour les petites. Avec une machine moyenne, si l'on s'arrange de façon à la faire travailler en surcharge

pendant les à-coups comme nous le dirons plus loin, on peut réaliser un rendement moyen de 0,80 à 0,85. La puissance indiquée sur les pistons s'en déduit.

PUISSANCE nominale.	NOMBRE de pôles.	POIDS total en tonnes.	DIAMÈTRE de l'induit.	NOMBRE de tours par minute.	RENDEMENT P. 100		
					à 1/4 de charge.	à 1/2 charge.	à pleine charge.
150	6	5,8	1,12	200	89	92,5	93,5
	6	16,5	1,60	120	89,5	»	»
225	6	15,3	1,60	150	»	»	»
	6	9,4	1,12	200	»	»	»
	6	27	1,60	100	89,5	93	93,5
300	6	19,6	1,60	150	»	»	»
	6	17,4	1,60	200	»	»	»
	8	33,1	1,80	80	89,5	93	94
400	8	31,9	1,80	100	»	»	»
	8	28,8	1,80	120	»	»	»
	6	26,6	1,65	150	»	»	»
	10	38,9	2,20	75	89,5	93	94
500	10	34,0	2,20	90	»	»	»
	10	31,8	2,20	100	»	»	»
	10	28,8	2,20	125	»	»	»
	10	49,1	2,35	80	90	93,75	94,5
800	10	45,0	2,35	100	»	»	»
	10	42,2	2,35	120	»	»	»
1 300	12	71,0	3,25	80	90,25	94	95
2 500	12	72,5	3,25	75	90,25	94	95

Le rendement moyen de l'ensemble générateur, dynamo et moteur, peut être estimé au plus à 0,75 ou 0,80. Ce dernier chiffre est atteint, par exemple, par les ensembles Willans employés à Bristol, Hobart, etc. Des chiffres supérieurs ont été indiqués, notamment à Liverpool, mais ils ne sauraient être acceptés comme sérieux ; au contraire, il arrive très souvent que les variations de charge et les frottements exagérés de la transmission abaissent la valeur moyenne en service normal à 0,60 ou 0,65.

Les bons constructeurs peuvent garantir un rendement moyen en service courant de 0,75.

Si l'on combine ces chiffres avec ceux donnés plus haut pour le rendement des moteurs, y compris la régulation, on trouve pour le rendement total entre les pistons et la jante des roues les chiffres suivants :

Grandes lignes de chemins de fer à arrêts peu nombreux :

	Moteurs et régulation.		Ligne.		Dynamos et moteurs à vapeur.		
	0,80	×	0,90	×	0,80	=	0,58
à	0,75	×	0,90	×	0,75	=	0,51

Métropolitains et tramways, dans des conditions favorables :

$$0,70 \times 0,90 \times \begin{cases} 0,80 \\ \text{à } 0,75 \end{cases} = \begin{cases} 0,50 \\ \text{à } 0,47 \end{cases}$$

Métropolitains et tramways, dans des conditions médiocres :

$$0,60 \quad \times \quad 0,90 \quad \times \begin{cases} 0,75 \\ \text{à } 0,80 \end{cases} = \begin{cases} 0,40 \\ \text{à } 0,32 \end{cases}$$

On peut considérer actuellement, pour des services à arrêts fréquents, le chiffre de rendement total de 0,50 comme un maximum difficilement atteint en dehors des projets de constructeurs et ceux de 0,30 à 0,40 comme des valeurs courantes ; on est même souvent descendu plus bas, à 0,25 par exemple, au début de la traction électrique.

On peut se servir de cette remarque pour vérifier directement la puissance indiquée P_i aux cylindres des génératrices, en calculant la puissance totale maxima prévue à la jante des voitures P_j. On posera, par exemple,

$$P_i = \frac{P_j}{0,40}.$$

Enfin, un autre bon chiffre pratique résultant des données d'expériences, c'est un rendement de 0,50 à 0,60 entre la jante des roues et les bornes des dynamos.

On pourrait, en indiquant au constructeur de l'usine la puissance aux bornes à réaliser, lui laisser la responsabilité d'y pourvoir de la façon la plus économique ; mais il est encore beaucoup plus sûr de le charger de faire lui-même l'estimation et de prévoir les variations de puissance.

Il ne faut pas perdre de vue, quand on étudie une station génératrice de traction, que les oscillations de puissance signalées ci-dessus entraînent à la fois une augmentation de puissance des machines génératrices par rapport à ce qu'exigerait la charge moyenne et une diminution de rendement résultant du fait que ces machines travaillent à une puissance moyenne très inférieure à leur charge la plus économique. Il en résulte que la dépense de charbon est relativement d'autant plus élevée que les fluctuations sont plus fortes. Cette dépense atteint couramment dans les stations de tramways 1,5 à 2,5 kg. par cheval-heure indiqué et 0,2 à 0,5 kg. par tonne-kilomètre effectuée, tandis qu'elle peut ne pas dépasser 0,7 kg. par cheval-heure indiqué dans une bonne machine à vapeur de 200 chev. à triple expansion et à condensation, en régime permanent normal, et 0,6 kg. dans les mêmes conditions dans une machine de 500 chev.

Barêmes pour le calcul des stations génératrices de tramways. — Quoi qu'on fasse, le calcul de la station est toujours peu précis, et, dans ces conditions, on préfèrera souvent s'en passer et se borner, au moins pour un avant-projet de tramway, à s'inspirer des résultats d'expériences ; lors même qu'on ferait un calcul plus complet, il sera toujours sage de se reporter à ces résultats à titre de vérification.

Le barême suivant résume les chiffres admis par divers ingénieurs améri-

cains pour les réseaux à déclivités moyennes exploités au moyen d'automobiles à 2 moteurs sans remorque :

NOMBRE d'automobiles à 2 moteurs en service.	PUISSANCE DES MACHINES A VAPEUR en chevaux indiqués par voiture	
	à 30 places (poids moyen, 7 t.).	à 50 places (poids moyen, 10 t.).
25 à 30	10	15
15 à 25	12	20
10 à 15	15	25
5 à 10	20	30
1 à 5	25	35

Sur les réseaux à déclivités plus fortes, ces chiffres doivent naturellement être majorés. Par exemple, une installation de 25 voitures, qui exigerait 10 à 12 chev. par voiture sur une ligne à faibles rampes, en demandera 12 à 15 sur une ligne à déclivités plus accentuées (2 à 3 p. 100) et 25 à 30 sur une ligne à très fortes rampes (5 à 6 p. 100).

Comme nous l'avons dit plus haut (p. 569), une voiture de remorque ajoutée à une automobile n'exige qu'un supplément de puissance d'environ 50 p. 100.

Les chiffres du tableau précédent sont élevés ; ils supposent qu'on recherche une vitesse assez grande et une accélération rapide.

En Europe, on pourra suivre avec plus de confiance le barème ci-contre (p. 691) de M. Max Corsepius[1], déduit de données d'expériences et qui est beaucoup plus complet que le précédent.

Ce tableau indique la puissance maxima à prévoir par voiture : en supposant l'équipement des voitures choisi d'après la déclivité maxima, il donne pour chaque type d'équipement cette puissance en fonction de la déclivité moyenne de la ligne; pour avoir la puissance totale qui devra être installée à l'usine (indépendamment de la réserve), on n'a qu'à multiplier le chiffre trouvé par le nombre des voitures circulant simultanément sur la ligne (déduction faite des véhicules en stationnement aux extrémités) et, en outre, par un coefficient de correction destiné à tenir compte de l'amplitude relative des oscillations suivant l'importance de l'installation ; ce coefficient pourra, par exemple, être pris égal à 1,3 s'il y a moins de 4 voitures en service, à 1,2 pour 4 à 6 voitures, à 1,1 pour 6 à 10 voitures et à 1 au delà de 10 voitures.

Le tableau suppose les voitures complètement chargées et effectuant leur parcours à la vitesse moyenne de 15 km : h. Pour d'autres vitesses et des charges moindres, il y aurait lieu de modifier proportionnellement les chiffres indiqués (en admettant que la régulation des moteurs puisse se faire d'une manière parfaitement économique à la vitesse adoptée, ce qui n'est pas toujours le cas).

Choix des unités génératrices. — L'importance de la force motrice nécessaire à l'usine une fois déterminée, il s'agit de choisir le nombre d'unités,

[1] *Loc. cit.*

LARGEUR DE VOIE ET ÉQUIPEMENT	NOMBRE APPROXIMATIF de places.	POIDS d'une voiture complètement chargée en tonnes.	VITESSE de marche en km : h.		RAMPE admissible (jusqu'à 1 500 m. de longueur).		RAMPE MAXIMA admissible (jusqu'à 200 m. de longueur).		PUISSANCE ÉLECTRIQUE NÉCESSAIRE A L'USINE PAR VOITURE en kilowatts (chevaux)							
									Déclivité moyenne = 0,003		Déclivité moyenne = 0,006		Déclivité moyenne = 0,013		Déclivité moyenne = 0,020	
			en rampe.	en palier.	sans voiture d'attelage.	avec voiture d'attelage.	sans voiture d'attelage.	avec voiture d'attelage.	sans voiture d'attelage.	avec voiture d'attelage.	sans voiture d'attelage.	avec voiture d'attelage.	sans voiture d'attelage.	avec voiture d'attelage.	sans voiture d'attelage.	avec voiture d'attelage.
Voie de 1 m., 2 moteurs de 12 chevaux.	25	6,5	10-15	15-25	0,028	0,010	0,035	0,015	(9,5) 7	(15,5) 11,5	(12) 9	(19) 14	(16) 12			
Voie normale ou de 1 m., 1 moteur de 20 chev.	30	7	10-15	15-25	0,020	0,05	0,043	0,022	(9,5) 7	(15) 11	(12) 9		(15,5) 11,5		(17) 12,5	
Voie normale ou de 1 m., 2 moteurs de 20 chev.	30	7,5	10-15	15-25	0,040	0,020	0,083	0,043	(10) 7,5	(16) 12	(13) 9,5	(20) 15	(17) 12,5	(27) 20	(19,5) 14,5	(32,5) 24
Voie normale ou de 1 m., 2 moteurs de 20 chev.	40	8	10-15	15-25	0,038	0,013	0,077	0,033	(11) 8	(17) 12,5	(13,5) 10	(21,5) 16	(17,5) 13	(28,5) 21	(20) 15	(34) 25
Voie normale ou de 1 m., 1 moteur de 35 chev.	40	7,5	10-15	15-25	0,040	0,020	0,083	0,043	(11) 8	(17) 12,5	(13,5) 10	(21,5) 16	(17,5) 13	(28,5) 21	(22,5) 16,5	(36) 26,5
Voie normale ou de 1 m., 2 moteurs de 35 chev.	40	9	10-15	15-25	0,058	0,033	0,125	0,077	(15) 11	(21) 15,5	(18) 13,5	(25,5) 19	(24) 18	(34) 25	(27) 20	(40) 30

N. B. — Les chiffres entre parenthèses indiquent les puissances en chevaux correspondant aux chiffres de kilowatts écrits au-dessous.

comprenant chacune un moteur à vapeur et la ou les dynamos correspondantes, entre lesquelles cette puissance totale sera répartie.

Commercialement, il y a avantage à n'installer qu'un petit nombre d'unités de grandes dimensions ; mais, comme il est toujours nécessaire d'avoir des machines de réserve, l'importance du capital ainsi immobilisé croît avec la grandeur des unités ; la question de la facilité des réparations intervient de son côté pour limiter les dimensions des machines. En pratique, la grandeur des unités employées dans les usines de traction varie, suivant l'importance de l'exploitation, entre 100 et 1 000 chev. ; exceptionnellement, on va jusqu'à 2 000 chev.

Entre ces limites, il y a encore une très large marge laissée à l'appréciation de l'ingénieur. Le fractionnement de la puissance doit être établi de façon à permettre de suivre approximativement les variations régulières de la charge au cours des deux ou trois périodes distinctes entre lesquelles se divise la journée, en mettant en marche ou arrêtant des unités.

On admet généralement en Amérique, dans les installations récentes, des proportions voisines des suivantes :

PUISSANCE maxima nécessaire.	NOMBRE des unités génératrices.	PUISSANCE de chaque unité.
chev.		chev.
200	2	200
400	3	200
600	3	300
1 000	3	500
1 500	4	500
2 000	4	750
5 000	6	1 000
10 000	6	2 000

Quant aux variations irrégulières et momentanées de la charge, on y pourvoit en faisant travailler les machines au moment des surcharges au delà de leur puissance normale. Ce serait une erreur, surtout pour les moteurs à vapeur, dont le rendement est loin de rester satisfaisant entre des limites aussi larges que celui des dynamos, de choisir les dimensions de la machine en vue de la réalisation d'une puissance normale (c'est-à-dire d'une puissance économique) égale à la charge maxima : on aurait alors des machines coûteuses à l'excès et qui travailleraient habituellement dans des conditions de rendement déplorables. On doit au contraire tirer parti des ressources qu'offre la variation de la détente et même au besoin de la pression initiale, en permettant aux moteurs à vapeur de développer à l'occasion une puissance supérieure de 50 à 100 p. 100 à leur puissance normale, pour rapprocher celle-ci autant que possible de la charge qu'on prévoit devoir se présenter le plus fréquemment. Pour les dynamos génératrices, dont le rendement reste généralement assez bon jusque vers la demi-charge, la capacité peut être choisie proportionnellement plus grande que pour des moteurs qui les actionnent ;

il faut avant tout les mettre à l'abri de tout échauffement exagéré et de tout crachement nuisible aux balais pendant les surcharges.

Quant aux chaudières, elles n'ont à subvenir qu'à la moyenne de la puissance développée par les machines, en sorte que leur capacité peut être prise notablement moindre que la puissance maxima de celles-ci ; on compte en général, avec des moteurs moyennement économiques, 12 m² de surface de chauffe par voiture en service.

Égalisation de la charge. — L'emploi d'une batterie d'accumulateurs en dérivation sur la ligne, soit à l'usine, soit en un point quelconque du réseau, permet, moyennant des artifices convenables de montage, d'uniformiser à peu près absolument la charge des génératrices ; celles-ci peuvent alors avoir une

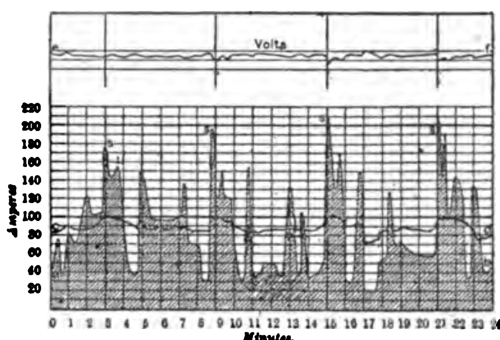


Fig. 888. — Courbes de débit de l'usine et des génératrices seules sur la ligne de Zürich-Hirslanden.

importance réduite et travailler à leur maximum de rendement. Pour tenir compte des pertes dans les accumulateurs, on prendra une puissance de 10 p. 100 supérieure à la puissance moyenne consommée sur la ligne[1] mias; on pourra admettre un rendement de 80 p. 100 pour les groupes moteurs-dynamos. La dépense de charbon par cheval s'abaisse en même temps d'une manière très importante. La réduction de ces deux éléments, puissance installée et dépense de combustible, est généralement suffisante, dans les installations de petite ou moyenne importance, pour couvrir amplement les frais d'amortissement et d'entretien de la batterie.

Par exemple, sur la ligne de Zürich-Hirslanden, d'une longueur totale de 4,55 km., où l'usine comprend 2 groupes générateurs de 90 chevaux et une batterie d'accumulateurs de 270 éléments Tudor de 5,45 amp.-heures couplée en dérivation, on a obtenu les résultats représentés par la figure 888 et résumés ci-après : tandis que le courant dépensé sur la ligne (courbe *ab*) varie de 20 à 210 amp., avec une moyenne de 90 amp., le courant des dynamos

[1] Ce chiffre de 10 p. 100 est empirique, car on peut difficilement calculer la quantité d'énergie qui passe par les accumulateurs. Si toute l'énergie consommée devait subir cette transformation, la perte serait de 25 à 30 p. 100 ; mais, en fait, la plus grande partie va directement des machines au réseau.

génératrices (courbe *cd*) ne varie que de 72 à 102 amp., et le voltage reste compris entre 535 et 560 volts ; le courant de la batterie est en moyenne de 30 amp., tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, et atteint parfois jusqu'à 120 amp. ; l'emploi de la batterie a donc réduit la puissance des machines nécessaire de plus de 50 p. 100 ; en même temps il a abaissé la consommation de charbon par cheval-heure de 2,5 à 1,5 kg. seulement ; le travail fourni par jour étant de 907 chevaux-heures et le charbon coûtant 38,90 fr. la tonne, l'économie annuelle qui en résulte peut être estimée à 12 877 fr., tandis que la batterie et ses accessoires, coûtant seulement 37 000 fr., n'exigent

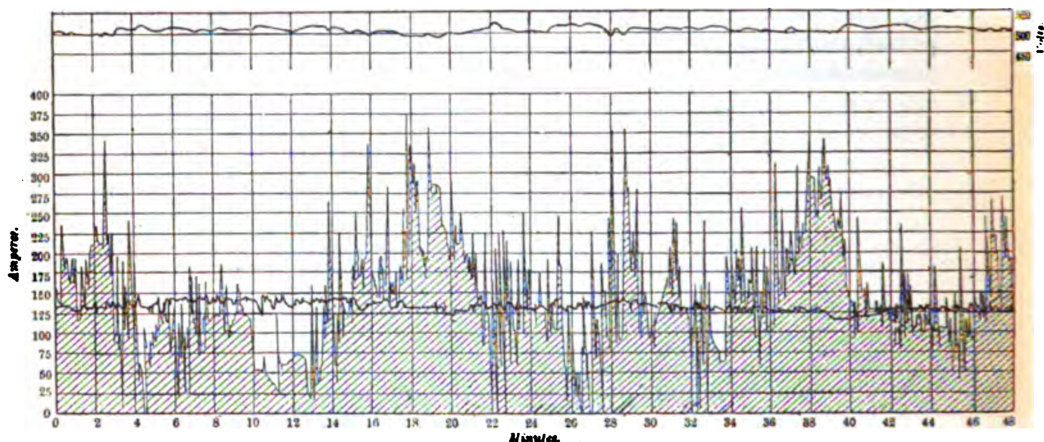


Fig. 889. — Courbes de débit de l'usine et des génératrices seules à la station des tramways de Remscheid après addition d'une batterie.

qu'un intérêt et un amortissement de 3 700 fr. Cet exemple fait bien ressortir l'économie d'exploitation qui résulte de l'emploi des accumulateurs dans une petite ou une moyenne installation.

De nombreuses applications du même système ont été faites en Europe, notamment à Remscheid, Meckenbeuren[1], Neufchâtel-Saint-Blaise, Fontainebleau.

A Remscheid, le réseau de 11 km. de longueur est très accidenté et présente des rampes de 0,106 ; aussi les variations de charge à l'usine sont-elles considérables. Avant l'addition de la batterie, le débit variait en semaine entre 100 et 400 amp. et le dimanche entre 0 et 450 amp. ; on devait avoir constamment en service 3 unités génératrices de 100 kilowatts — 160 chevaux, bien que le débit moyen ne fût que de 232 amp. en semaine et de 135 amp. le dimanche. Le trafic augmentant, il eût fallu une nouvelle unité ; on a préféré ajouter une batterie : aussitôt la charge a été uniformisée, comme le montre la figure 889, et il a suffi d'une seule unité génératrice pour assurer le service du dimanche et de deux pour les jours de semaine ordinaires. La batterie

[1] Cf. L. Schröder, « Elektrische Strassenbahnen mit stationären Akkumulatoren », *Angelegenheiten des Electro technischen Vereins*, 15 décembre 1896.

de 250 éléments de 648 amp.-h. supporte un courant de décharge moyen de 216 amp. et un courant maximum de 420 amp.; son prix d'établissement n'atteint pas la moitié de celui de l'unité génératrice rendue disponible pour accroître la puissance de l'usine.

En Amérique, où l'on a été pendant longtemps peu partisan des accumulateurs, ceux-ci sont également employés maintenant dans plusieurs stations, non seulement sur de petites lignes comme celles de Merrill, Woonsocket, etc., où les résultats obtenus sont analogues à ceux de Zürich, mais encore sur des réseaux importants, tels que celui de Buffalo. Dans cette dernière installation, la batterie est alimentée par des convertisseurs tournants, recevant l'énergie des usines du Niagara au moyen d'une transmission triphasée de 35 km. de longueur, et composée de 290 éléments de 1 200 chevaux-heures de capacité; elle a pour effet d'uniformiser le débit des convertisseurs et de les faire ainsi travailler toujours à pleine charge. Cette combinaison, également employée à Neufchâtel-Saint-Blaise, permet de tirer le meilleur parti du contrat forfaitaire avec une société fournissant l'énergie.

Les graphiques des figures précédentes montrent d'une manière particulièrement nette l'influence de la batterie sur la constance du voltage de distribution. Cet effet est encore plus sensible lorsqu'on la place sur le réseau lui-même, au point le plus chargé. Une très intéressante application de ce genre a été faite en 1897 par l'Union Traction Co. de Philadelphie sur sa ligne de Chesnut-Hill, dont la longueur totale, comptée à partir de la station génératrice, atteint près de 18 km.; malgré cette grande longueur, la ligne a pu être établie sans dépense exagérée de cuivre grâce à l'addition d'une batterie à Chesnut-Hill, à 2,5 km. de l'extrémité; cette batterie a réalisé également une réelle économie sur les frais d'exploitation, par le fait que le courant consommé étant plus faible entraîne une perte plus réduite par effet Joule dans la ligne.

Nous n'insisterons pas sur ce dernier côté de la question, qui sort de notre cadre, et nous tenons seulement à faire bien ressortir ici la réduction de puissance des unités génératrices résultant de l'uniformisation.

L'adjonction d'une batterie d'accumulateurs présente aussi de grands avantages sur les métropolitains, où il se produit des demandes de courant énormes au moment du démarrage de chaque train; c'est, comme nous l'avons vu précédemment (p. 538), le meilleur moyen de réaliser économiquement ce genre de service, surtout lorsque les trains sont lourds et peu nombreux.

Il n'en est plus de même dans les grands réseaux de tramways, où la charge est déjà naturellement assez uniforme; une batterie serait alors sans effet utile appréciable, au moins dans les cas ordinaires. Cependant, si l'on voulait, dans un but d'économie de combustible, employer les moteurs à gaz pauvre, qui n'ont qu'une faible élasticité de régime, il serait nécessaire encore de recourir à l'emploi d'une batterie d'égalisation, comme on l'a fait par exemple à Zürich, à Lausanne, etc.; pour que cette solution soit avantageuse, il suffit que l'économie de combustible réalisée par l'emploi de ces moteurs dépasse les frais annuels d'amortissement et d'entretien de la batterie et de ses accessoires.

Il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue dans ces installations qu'une batterie ne peut être réellement efficace comme volant que si on la combine avec un

moteur convenablement disposé pour élever sa f. é. m. à la décharge et la combattre à la charge; c'est là un accessoire aujourd'hui sanctionné par la pratique et reconnu indispensable [1].

III. — Traction mixte

Le système de traction mixte, appliqué pour la première fois à Hanovre, puis à Dresde et plus récemment à Paris-Aubervilliers, consiste, comme on le sait, dans l'emploi sur les voitures d'une batterie à poste fixe et à charge rapide, qui se charge en dérivation sur le fil de trôlet pendant le parcours extra muros et sert ensuite à alimenter les moteurs dans l'intérieur de la ville où la ligne aérienne est supprimée.

L'expérience a montré que, pour avoir un bon rendement, il ne fallait pas prolonger la charge au delà d'un certain temps.

Par exemple, à Hanovre, le meilleur résultat a été obtenu en chargeant sur 1 400 m. pour décharger sur 3 800 m.; on atteignait ainsi pour la batterie un rendement de 0,74. Pratiquement on ne réalise qu'environ 0,70; la charge s'effectue sur un parcours de 2,8 à 8 km. et la décharge sur un parcours variant de 5 à 12 km. La batterie de 2,4 t. se compose de 200 éléments de 12 kg., dont 9 kg. d'électrodes, ayant une capacité de 25 amp.-heures; la charge a lieu entre 500 et 550 volts, la décharge entre 400 et 380; le courant de charge peut atteindre 100 amp. et la charge peut se faire en un quart d'heure; la décharge a lieu à 3 ou 4 amp. par kilogramme d'électrodes.

Ce système, très souple, se prête à bien d'autres combinaisons : on peut en particulier recharger aux arrêts, en disposant soit des prises de courant, comme sur les lignes de la Madeleine à Courbevoie et Levallois, soit des tronçons de fil de trôlet au-dessus de la voie, puisque 10 minutes de charge suffisent dans l'installation que nous venons de citer pour 1 heure 1/2 de trajet; il suffirait de réaliser une charge de 1 à 2 minutes toutes les 10 minutes pour 2 km. environ de trajet. On peut réduire le poids de la batterie au minimum en ajoutant une distribution

[1] Ce système a été imaginé par M. Pirani et appliqué par lui à Fontainebleau, en Allemagne à Remscheid, etc.

directe par fil aérien ou souterrain sur les parties de lignes en forte rampe et au départ des stations d'arrêt fixe.

Le calcul se fera dans chaque cas d'après les chiffres donnés plus haut pour les accumulateurs à charge rapide, et il ne présente rien de particulier ; il va sans dire qu'on n'utilisera ici qu'une fraction encore plus faible de la capacité et que c'est la puissance à débiter à la charge et à la décharge qui déterminera le choix de la batterie.

En ce qui concerne l'usine génératrice, elle se trouve dans les meilleures conditions et sa charge est pratiquement uniformisée, toutes les fluctuations du débit de la ligne étant amorties par les accumulateurs placés en dérivation ; le rendement des machines, travaillant à pleine charge, est excellent.

Il en résulte que, malgré les pertes supplémentaires occasionnées par les accumulateurs relativement à la dépense sur une ligne à alimentation directe, la puissance des machines génératrices n'a pas besoin d'être plus grande que dans une exploitation à trôlet simple et la dépense de charbon n'est pas plus élevée. L'expérience déjà assez longue de Hanovre permet de vérifier cette conclusion : lorsqu'on a équipé les deux tiers des voitures avec des accumulateurs, on a vu la dépense d'énergie s'élever de 438 à 605 watts-heures par voiture-kilomètre; mais le rendement de l'usine est monté de 320 à 480 w.-h. par kilogramme de charbon, et la dépense de charbon par kilomètre-voiture, malgré le poids plus élevé des véhicules, est restée la même (1,18 kg. en août 1895 et 1,20 kg. en août 1896).

§ 5. — Moyens a employer pour réduire les dépenses d'énergie

Il est intéressant de signaler, en terminant l'exposé de cette question, la possibilité où l'on se trouve souvent de réaliser des économies très sérieuses sur la dépense d'énergie, au prix de quelques précautions.

Moyens ordinaires. — Chacun des arrêts est une cause de perte importante; on doit donc en réduire le nombre au minimum, 3 ou

4 par km. en ville, 1 ou 2 dans les faubourgs, et pour cela les faire seulement en des points bien déterminés du trajet, par exemple aux croisements de rues, en proscrivant, s'il est possible, tout arrêt intermédiaire.

Il en est de même du freinage, tout travail consommé dans les freins étant un travail perdu mal à propos. On peut éviter cette dernière perte, d'une part en pratiquant la récupération sur les pentes, de l'autre en évitant sur les tramways l'usage abusif des freins pour l'arrêt au droit des stations : un bon mécanicien doit rompre le courant à une distance suffisante de la station pour que la vitesse de la voiture s'amortisse presque entièrement d'elle-même.

Sur les métropolitains, comme on l'a vu, le freinage est de règle et absolument nécessaire ; on ne pourrait en réduire les inconvénients que par la récupération, comme nous l'indiquerons plus loin.

Au contraire, sur les tramways, la dérive partielle des voitures doit toujours être pratiquée, dans les limites signalées plus haut (p. 623), car, les vitesses étant moins grandes et le coefficient de traction au contraire plus élevé que sur des chemins de fer, le ralentissement y est sensiblement plus rapide ; par exemple, en palier, sur voie Broca, une automobile sans courant a un coefficient de traction de 10 à 15 kg. par tonne, au lieu de 5 à 10 sur voie Vignole.

Une autre cause de perte très importante réside dans les démarrages, à cause du mauvais rendement des moteurs à ce moment et des patinages partiels qu'on produit lorsqu'on admet un courant trop fort ; cette perte est beaucoup augmentée si l'on retire trop vite les résistances et si l'on met les moteurs en parallèle avant que la voiture ait pris une vitesse suffisante. Cette manière de faire est d'autant plus condamnable que, contrairement à ce que croient la plupart des mécaniciens, on ne gagne presque rien en rapidité à démarrer trop vite ; M. G. W. Knox, ingénieur de la Chicago City Railway Co., a, par exemple, mis ce fait bien en évidence par des expériences dont nous avons donné plus haut (p. 542) les résultats détaillés.

On pourrait empêcher automatiquement toute manœuvre trop précipitée des régulateurs en les munissant, comme l'a fait

M. Short, d'un encliquetage électro-magnétique qui s'ouvre seulement quand le courant est assez réduit ; cet artifice présente un intérêt économique suffisant pour mériter des applications. Il est bon de remarquer d'ailleurs, en passant, que les mises en marche trop rapides occasionnent en Amérique plus de 65 p. 100 des accidents de personnes, entraînant pour les compagnies l'allocation de grosses indemnités [1].

Enfin, un autre point important est de ne pas conserver de résistance dans le circuit des moteurs pendant la marche et pour cela de ne pas laisser le régulateur sur les touches indiquées comme positions de passage [2].

On conçoit donc que, suivant l'attention et l'intelligence plus ou moins grandes des mécaniciens, les consommations soient très différentes. M. Reckenzaun avait constaté autrefois des différences de ce chef de 20 p. 100 sur la même voiture. Plus récemment, M. H. S. Hering a fait des comparaisons très intéressantes sur le même sujet [3] : il a fait faire à plusieurs reprises un même trajet sur la ligne de Pikesville Road alternativement par deux mécaniciens dont l'un ordinaire, et l'autre exceptionnellement expérimenté; il a constaté d'abord que chacun d'eux reproduisait toujours la même consommation à 1 ou 2 p. 100 près tout au plus, ce qui tient à l'habitude que prennent les agents, en faisant plusieurs milliers de fois le même voyage par an, de manœuvrer leur régulateur toujours de la même manière ; mais le mécanicien expérimenté consommait 20 p. 100 de moins que l'autre, grâce à sa plus grande habileté dans les arrêts et démarrages. En admettant que ce chiffre de 20 p. 100 soit exceptionnel, la différence atteint néanmoins facilement 5 à 10 p. 100 entre les divers mécaniciens de la même ligne. Or, sur la ligne de Pikesville Road, une différence de 10 p. 100 se traduit par une économie de 350 fr. par voiture et par an. D'une manière

[1] Cf. *Street Railway Journal*, septembre 1897.

[2] Une grande amélioration a été réalisée, comme on l'a vu, par la substitution de la méthode série-parallèle à la méthode du rhéostat pour la régulation de la marche. La comparaison entre les deux méthodes à ce point de vue ayant été faite plus haut avec détails (p. 173), nous nous bornerons à en rapporter ici la conclusion, à savoir que l'emploi du rhéostat comme seul moyen de réglage entraîne une perte supplémentaire d'énergie d'environ 30 p. 100 sur les lignes ordinaires en service régulier, qui atteint facilement 50 p. 100 pendant les démarrages.

[3] *Electric Railway Gazette*, 31 août et 23 novembre 1895.

générale, les 5 à 10 p. 100 d'économie facilement réalisables équivalent à 3 ou 8 w.-h. par tonne kilométrique ; au prix de revient moyen de 10 centimes le kw.-h. pour une petite station, cela fait une économie de 0,03 à 0,08 centime par tonne kilométrique, ce qui n'est pas négligeable.

Il ne faut pas oublier non plus, quand on s'occupe d'économie, que le poids utile, c'est-à-dire le poids des voyageurs transportés, n'est qu'une faible fraction du poids brut des voitures. On doit donc chercher à réduire le plus possible le poids mort (voir p. 506), de façon à diminuer la dépense par tonne utile, et pour cela diminuer le poids des voitures. Une réduction d'une demi-tonne sur le poids d'une voiture peut entraîner une économie de 30 à 40 w.-h. par kilomètre-voiture, soit 0,24 à 0,32 centime au prix de 10 centimes le kw.-h.

Comme on l'a vu déjà, l'emploi d'un seul moteur au lieu de deux réalise une économie importante lorsque le poids adhérent est suffisant, ce qui est le cas ordinaire sur les lignes en terrain plat; la réduction de puissance serait de 10 p. 100 d'après les essais de Siemens et Halske, de 15 à 20 p. 100 d'après ceux de M. Sperry et de 15 à 30 p. 100 au moins d'après ceux de M. G. F. Sever. C'est là un argument très sérieux en faveur de l'équipement simple dans les petites villes.

Enfin, sur les lignes à déclivités prononcées, la récupération de l'énergie sur les pentes est tout indiquée. Si on ne l'a pas pratiquée plus généralement jusqu'ici, cela tient probablement à ce qu'on a reculé devant l'emploi des moteurs excités en dérivation ; mais la méthode mixte que nous avons décrite ci-dessus (p. 106) échappe aux inconvénients reprochés à ces moteurs. Nous allons examiner les résultats de cette récupération au point de vue économique.

Récupération de l'énergie sur les pentes. — Le principe de la récupération, c'est, au lieu de recourir à l'emploi de freins mécaniques ou électriques, de faire fonctionner sur les fortes pentes les moteurs comme générateurs et de renvoyer le courant qu'ils produisent dans le réseau ou dans des accumulateurs.

Nous étudierons la valeur économique de ce système d'abord

suivant les raisonnements ordinaires, puis à l'aide de procédés plus précis.

Raisonnement approximatif. — Soient i' et i'' les pentes limites que descendent respectivement une voiture d'attelage et une automobile sans courant sous l'effet de leur propre poids, η le rendement des moteurs comme réceptrices, η' leur rendement comme génératrices ; soient, dans un train, P le poids des automobiles et Q celui des voitures d'attelage.

La pente minima α que le train descendra en vertu de son propre poids est donnée par l'égalité

$$P(\alpha - i'') + Q(\alpha - i') = 0,$$

d'où
$$\alpha = \frac{Pi'' + Qi'}{P + Q}.$$

Pour les pentes supérieures, il y a récupération. Afin de tenir compte du rendement η' des moteurs, nous remarquerons que la puissance transmise par l'essieu aux engrenages et au moteur est, à la vitesse V,

$$[P(i - i'') + Q(i - i')]\,V.$$

La dynamo ainsi actionnée débitera donc à ses bornes une puissance électrique

$$\eta'[P(i - i'') + Q(i - i')]\,V = \eta'(P + Q)(i - \alpha)\,V.$$

La puissance électrique consommée par le moteur pour monter la même déclivité en rampe est, d'autre part, dans les mêmes hypothèses,

$$\frac{1}{\eta}[P(i + i'') + Q(i' + i)]\,V = \frac{1}{\eta}(P + Q)(i + \alpha)\,V.$$

Sur une ligne à trôlet, la puissance récupérée sera employée à peu près intégralement à alimenter les voitures ou trains voisins, les pertes dans la ligne entre voitures étant négligeables. Au contraire, avec les voitures à accumulateurs, 25 à 30 p. 100 de cette énergie seront perdus dans ces appareils par suite de leur rendement imparfait.

Si l'on appelle γ le rendement des accumulateurs, le rapport de

l'énergie récupérée sur une pente à celle dépensée sur la même partie de voie pour la gravir en sens inverse peut être appelé, suivant l'expression heureuse de M. Sarcia[1], *coefficient de récupération k* sur cette pente. On l'obtient en prenant le rapport des deux puissances électriques calculées ci-dessus, d'où

$$k = \gamma\eta_1\eta_1' \frac{i - \alpha}{i + \alpha}.$$

Cette expression est intéressante parce qu'elle montre l'influence des divers éléments de la question : le rapport $\frac{i-\alpha}{i+\alpha}$ ne dépend que de la voie et du matériel roulant, η_1, η_1' que du moteur et de ses engrenages, et enfin γ que des accumulateurs. On voit a priori que la récupération est toujours forcément assez faible à cause de la présence des trois rendements γ, η_1, η_1' en facteurs. En admettant que l'on ait, par exemple, $\gamma = 0{,}70$, $\eta_1 = \eta_1' = 0{,}75$, engrenages compris, ce qui est suffisamment élevé comme chiffre pratique, le produit

$$\gamma\eta_1\eta_1' = 0{,}39,$$

soit 0,40 en nombre rond. Sans accumulateurs, on a sensiblement $\gamma = 1$ et $\eta_1\eta_1' = 0{,}56$.

En définitive, en désignant toujours par i' la pente limite que la voiture privée de ses engrenages et moteurs descendrait seule,

[1] *Industrie Électrique*, 10 décembre 1895. Dans cette intéressante étude, M. Sarcia est arrivé, pour les automobiles de tramways, à une expression différente, beaucoup plus favorable aux accumulateurs,

$$k = \gamma \frac{i - f}{i + f},$$

en appelant f un coefficient de traction fictif englobant toutes les pertes par frottements dans le moteur et même les pertes électriques. Nous ne pouvons accepter cette formule, malgré sa séduisante simplicité, pour les motifs déjà invoqués plus haut contre ces coefficients fictifs, à savoir qu'ils sont essentiellement variables et mal définis. Dans les expériences exécutées sur les tramways de Paris-Saint-Denis, par exemple, suivant le courant qui passait dans les moteurs, f variait de 9,04 à 14,34 kg. par tonne sur une même voie et avec une même voiture, par le seul fait des variations du rendement des moteurs. Cette simple constatation montre la nécessité de laisser les pertes dans le moteur exprimées sous forme de rendement.

Il est, du reste, facile de démontrer que la formule ci-dessus conduit à des résultats inexacts. En effet, imaginons la voiture sur une pente très forte où f sera négligeable devant i ; le coefficient de récupération k deviendra alors égal à γ, c'est-à-dire dépendra seulement du rendement des accumulateurs et nullement des propriétés du moteur. Il est bien évident, au contraire, que si l'on néglige les résistances passives comme nous le faisons devant le travail de la pesanteur, le coefficient de récupération doit être a priori $k = \gamma\eta_1\eta_1'$.

le coefficient de récupération a actuellement pour maximum pratique la valeur

$$k = 0,40 \frac{i - \alpha}{i + \alpha} \text{ (lignes à accumulateurs).}$$

ou

$$k' = 0,55 \frac{i - \alpha}{i + \alpha} \text{ (lignes à alimentation directe)}$$

En admettant une récupération de 0,50 sur une ligne à trôlet, l'énergie supplémentaire dépensée sur les déclivités supérieures à la valeur α définie plus haut serait réduite de moitié.

Supposons que la dépense supplémentaire moyenne occasionnée par les rampes avant la récupération soit de 100 w.-h. par tonne kilométrique; l'économie serait de 50 w.-h. ; à 10 centimes le kilowatt-heure pris à l'usine, elle produirait une diminution de 0,5 centime par tonne kilométrique, ce qui est très notable.

En admettant que l'économie soit seulement 12,5 w.-h. par tonne-km., on ferait encore un bénéfice de 100 w.-h. par km. sur une voiture de 8 t., c'est-à-dire 1 centime par voiture-kilomètre.

S'il s'agit d'une ligne desservie, par exemple, par 20 voitures, faisant chacune 150 km. par jour ou 50 000 km. par an, l'économie due à la récupération atteindrait

$$50\,000 \times 20 \times 0,01 \text{ fr.} = 10\,000 \text{ francs.}$$

Elle vaut donc la peine qu'on s'en occupe pour toutes les lignes à fortes rampes.

Récupération réalisable à l'aide de moteurs donnés. — En réalité, les raisonnements qui précèdent, s'appuyant sur des coefficients de rendement constants, ne donnent qu'une idée fort imparfaite de la récupération sur un profil à déclivité variable. La dépense d'excitation et les pertes par frottement doivent jouer au contraire un rôle essentiel.

Pour montrer ce rôle, considérons une automobile de 11 t. à 2 moteurs excités en shunt et couplés en parallèle, circulant sur une voie Vignole[1] où la résistance en palier est de 5 kg : t., et supposons que les courbes en traits pleins de la figure 890 représentent les conditions pratiques de fonctionnement de

[1] Nous prenons dans cet exemple un cas particulièrement favorable à la récupération.

chacun des moteurs sous 500 volts en fonction du courant d'induit ; les pertes à vide correspondent à 50 kg. d'effort à la jante. Soit 2 amp. le courant d'excitation de chaque moteur ; la courbe du courant total sera la courbe du courant d'induit décalée de 2 amp. parallèlement à l'axe des abscisses ; la courbe des vitesses doit être décalée de la même quantité. Les courbes du courant récupéré effectivement sur pentes (excitation déduite), en fonction de l'effort et de la vitesse, s'obtiennent comme on l'a vu plus haut (p. 178) en construisant les symétriques obliques de ces deux courbes par rapport aux lignes d'effort et de vitesse théoriques du moteur supposé dénué de pertes.

Fig. 890. — Fonctionnement d'une automobile à 2 moteurs en récupération. — Courbes d'effort et de vitesse pour un moteur en fonction du courant.
Traits pleins : marche ordinaire. — Traits pointillés : marche en récupération.

Pour étudier la récupération sur une pente quelconque, il suffit de comparer les courants et les vitesses correspondant à un même effort.

Soit par exemple une pente de 20 mm : m. ; l'effort de traction correspondant est

$$11\,(5 + 20) = 275 \text{ kg. ou } 137{,}5 \text{ kg. par moteur ;}$$

le courant total dépensé I est de 19,4 amp. par moteur et le courant total récupéré I′ de 0,6 amp.

Mais il faut retrancher du courant dépensé 9,4 amp. par moteur qui eussent été consommés en palier pour produire l'effort normal de 55 kg. ; le courant dépensé par le fait de la rampe est donc seulement de 10 amp.

Les durées d'application de ces courants sont inversement proportionnelles aux vitesses V et V′ correspondant aux courants I et I′. Le coefficient de récupération ou rapport de l'énergie récupérée à l'énergie dépensée par le fait de la rampe est donc

$$\frac{V}{V'}\,\frac{I''}{I}.$$

RÉCUPÉRATION SUR DIFFÉRENTES DÉCLIVITÉS

DÉCLIVITÉ EN MILLIMÈTRES PAR MÈTRE	MONTÉE — EFFORT RÉSISTANT en kg. — dû à la traction R.	MONTÉE — EFFORT RÉSISTANT en kg. — dû à la pesanteur p.	MONTÉE — EFFORT RÉSISTANT en kg. — total (par moteur) $\frac{R + p}{2}$.	MONTÉE — COURANT par moteur, en amp. — total I (courbe I).	MONTÉE — COURANT par moteur, en amp. — dans l'induit, I − 2.	MONTÉE — COURANT par moteur, en amp. — relatif à la rampe seule I − 9,4.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC LES 2 MOTEURS en parallèle. — Effort de la gravité, par moteur.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC LES 2 MOTEURS en parallèle. — Courant récupéré par moteur I'.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC LES 2 MOTEURS en parallèle. — Courant dans l'induit I' + 2.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC LES 2 MOTEURS en parallèle. — Rapport des vitesses $\frac{500 - 0,7\,(I - 2)}{500 + 0,7\,(I' + 2)}$.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC LES 2 MOTEURS en parallèle. — Coefficient de récupération $\frac{500 - 0,7\,(I - 2)}{500 + 0,7\,(I' + 2)} \times \frac{1}{I - 9,4}$.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC UN SEUL MOTEUR — Effort total de la gravité $x \times 11$.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC UN SEUL MOTEUR — Courant récupéré I_1'.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC UN SEUL MOTEUR — Courant dans l'induit $I_1' + 2$.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC UN SEUL MOTEUR — Rapport des vitesses $\frac{500 - 0,7\,(I - 2)}{500 + 0,7\,(I_1' + 2)}$.	DESCENTE — RÉCUPÉRATION AVEC UN SEUL MOTEUR — Coefficient de récupération $\frac{500 - 0,7\,(I - 2)}{500 + 0,7\,(I_1' + 2)} \times \frac{I_1}{2\,(I - 9,4)}$.	OBSERVATIONS
14,8	55	163	$\frac{218}{2} = 109$	16,8	14,8	7,4						163	0	2		0	Descente possible avec un moteur excité.
18,4	»	205	130	18,7	16,7	9,3	102,5	0	2		0	205	3,8	5,8	0,969	0,198	
20	»	220	137,5	19,4	17,4	10	110	0,6	2,6	0,972	0,058	220	5	7	0,966	0,241	
25	»	275	165	21,9	19,9	12,2	137,5	3	5	0,965	0,232	275	9,8	11,8	0,956	0,392	
30	»	330	192,5	24,4	22,4	15	165	5,3	7,3	0,959	0,339	330	14,3	16,3	0,947	0,451	
40	»	440	247,5	29,4	27,4	20	220	10	12	0,946	0,473	440	23,6	25,6	0,928	0,548	
50	»	550	302,5	34,5	32,5	25,1	275	14,6	16,6	0,933	0,542	550	32,8	34,8	0,910	0,595	
60	»	660	357,5	39,8	37,8	30,4	330	19,3	21,3	0,920	0,584	660	42	44	0,889	0,614	
80	»	880	467,5	49,8	47,8	40,4	440	28,5	30,5	0,897	0,633	880	60,4	62,4	0,860	0,643	
100	»	1 100	577,5	59,8	57,8	50,4	550	38	40	0,870	0,656	1 100	79	81	0,825	0,647	
120	»	1 320	687,5	69,9	67,9	60,5	660	47,4	49,4	0,846	0,663	1 320	100	102	0,792	0,639	
140	»	1 540	797,5	80	78	70,6	770	56,8	58,8	0,823	0,662						Courant en palier, par moteur = 9,4 amp.

En appliquant cette méthode au calcul de la récupération sur différentes rampes avec un ou deux moteurs, on obtient les résultats du tableau de la page 705, représentés graphiquement par les courbes de la figure 891. Dans le cas où un moteur seul fonctionne, nous avons admis une résistance supplémentaire de 3 kg. par tonne ou 33 kg. au total du fait des frottements du mécanisme tournant à vide. Malgré cet accroissement, il y a intérêt, comme on le voit, à n'employer à la descente sur les faibles pentes qu'un seul moteur, grâce à la réduction des pertes par hystérésis et de la dépense d'excitation.

Il est facile de disposer les régulateurs en conséquence de façon à permettre de mettre l'un des deux moteurs hors circuit dans la marche en parallèle.

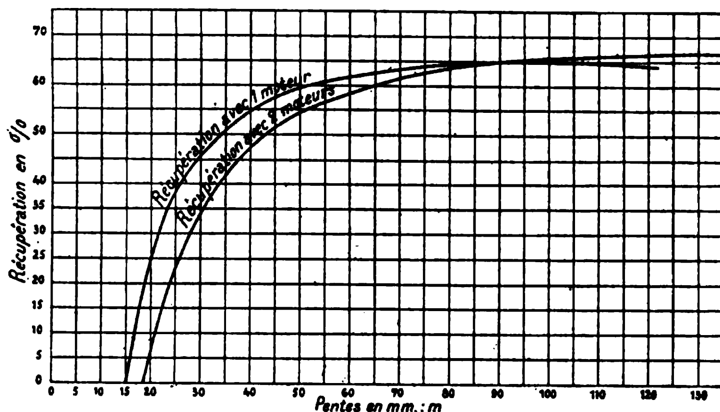


Fig. 891. — Coefficients de récupération en fonction de la déclivité des rampes avec un ou deux moteurs fonctionnant comme générateurs à la descente.

Dans l'exemple qui précède, la récupération ne commence que sur les pentes de 1,5 p. 100; la limite serait même reportée à 2 p. 100 et au delà sur des rails à ornière ou avec des moteurs ayant une plus forte consommation à vide. On voit donc combien les résultats obtenus diffèrent de ceux que donnent les formules précédentes.

Récupération sur un profil donné. — On peut, quand on possède le profil d'une ligne, calculer d'une manière complète l'énergie récupérée dans un parcours aller et retour : il suffit pour cela d'appliquer la méthode de la page 617, en lisant sur l'épure, pour les déclivités qui dépassent la limite, les courants d'après la courbe de récupération au lieu de la courbe de marche normale. Nous prendrons comme exemple la partie urbaine de la ligne de la page 613, que nous supposerons parcourue successive-

ment dans les deux sens par une voiture équipée comme nous venons de le dire, à la vitesse moyenne de 15 km : h.

Supposons que l'effort résistant dû au mécanisme du moteur inutilisé soit de 33 kg. et traçons sur le graphique (fig. 892) une horizontale à l'ordonnée — 33; il y aura récupération possible sur les pentes donnant lieu à des efforts négatifs supérieurs à 33 kg. en valeur absolue et les travaux récupérables sont représentés par les surfaces couvertes de hachures. Les calculs relatifs à ce graphique sont résumés dans le tableau ci-dessous; pour les simplifier, comme les vitesses restent sensiblement les mêmes, nous avons admis qu'on pouvait sans erreur sensible les remplacer par leur moyenne.

Longueur en kilomètres.	ALLER							RETOUR						
	Effort résistant total.	Effort résistant du moteur inutilisé.	Effort de récupération.	Courant d'induit dépensé.	Courant d'induit récupéré.	Énergie dépensée en watts-heures.	Énergie récupérée en watts-heures.	Effort résistant total.	Effort résistant du moteur inutilisé.	Effort de récupération.	Courant d'induit dépensé.	Courant d'induit récupéré.	Énergie dépensée en watts-heures.	Énergie récupérée en watts-heures.
		Kg.	Kg.	Amp.	Amp.				Kg.	kg.	Amp.	Amp.		
0,110	— 29	33		2,2		8		+ 249	33		32		109	
0,832	+ 257			33		851		— 37			2		51	
0,687	+ 341			41		873		— 121	33	— 88		3		64
0,021	+ 440			50		32		— 19,8			4		2,6	
0,0226	+ 470			53		36		— 47			0,1			
0,0644	+ 368			42		83		— 148	33	— 115		5		10
0,471	+ 614			66		963		— 395	33	— 362		26		345
0,077	+ 605			65		155		— 385	33	— 352		25		60
0,014	+ 220			30		13		0			6		2,6	
0,032	+ 277			35		34		+ 58			15		15	
0,156	+ 220			30		145		0			6			
0,0403	+ 421			48		232		+ 200			28		34	
0,1907	+ 220			30		176		0			6		36	
0,224	+ 507			56		388		— 287	33	— 254		17		120
0,430	+ 356			42		559		— 136	33	— 103		4		54
0,015	+ 440			50		23		— 55	33	— 22	2		0,6	
0,0135	+ 560			61		2		— 180	33	— 147		8		0,3
0,37165	+ 482			54		609		— 262	33	— 229		15		173
0,229	— 121	33	— 88		3,5		25	+ 341			41		292	
0,027	+ 79			17		121		+ 542			59		49	
	Total.					5 303	25	Total.					592	826

Résumé : énergie dépensée = 5 303 + 592 = 5 895 watts-heures + 268 w.-h. (voir p. 708)

— récupérée = 25 + 826 = 851 — — 268 w.-h.

$$\text{Rapport} = \frac{851 - 268}{5\,895 + 268} = \frac{583}{6\,163} = 0{,}095.$$

Nous avons laissé de côté dans les colonnes des ampères le courant d'excita-

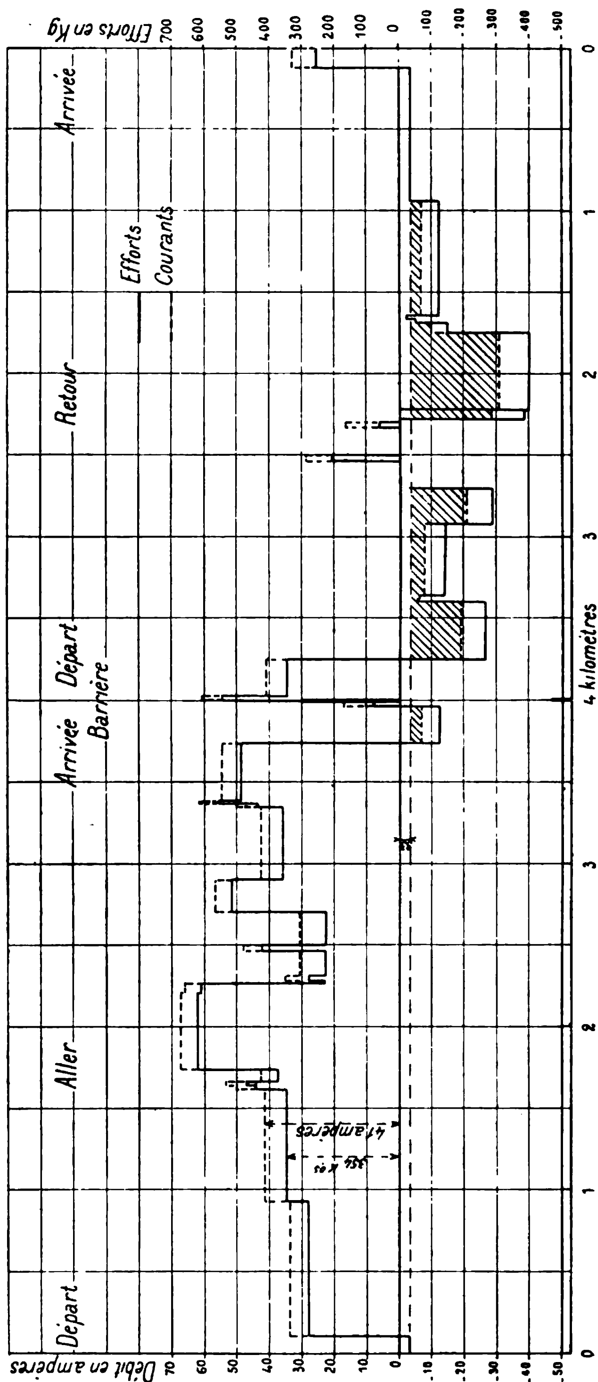


Fig. 892. — Graphique des efforts et des courants avec récupération sur la partie AB de la ligne de la page 613.

tion ; il en résulte pendant la récupération une perte d'énergie supplémentaire que nous avons évaluée d'autre part à 268 w.-h. D'où le rapport indiqué au bas du tableau.

Le rôle pratique de la récupération est confirmé par l'usage qu'on fait de cette méthode depuis plusieurs années sur les voi-

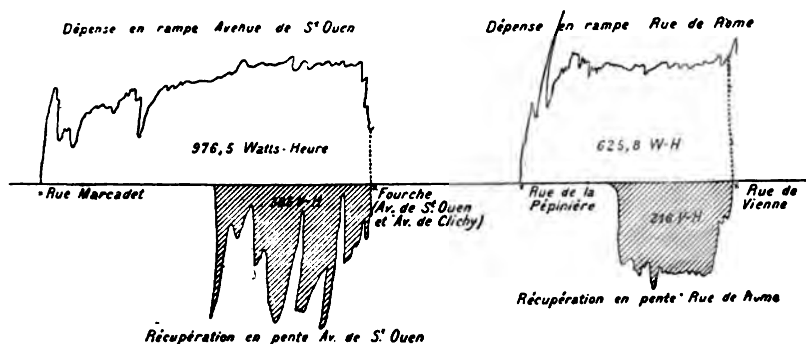


Fig. 893. — Courbes de wattmètre enregistreur indiquant la dépense d'énergie et l'énergie récupérée (aire hachurée) en deux points du parcours de la ligne Madeleine-Saint-Denis (les ordonnées sont courbes).

tures à accumulateurs des lignes de Paris-Saint-Denis, sur lesquelles on rencontre des rampes atteignant 3,8 p. 100.

La figure 893 donne des exemples de tracés de wattmètre enregistreur relevés par M. Sarcia sur deux rampes de cette ligne ; les parties hachurées représentent l'énergie récupérée, et celle-ci, mesurée en planimétrant les surfaces, a été trouvée de 14 p. 100 pour l'ensemble du parcours ; ce chiffre est assez élevé pour justifier l'emploi de cet artifice dans le cas considéré.

Conclusions. — D'une manière générale, on peut conclure de ce qui précède que la récupération est rationnelle sur les lignes à fortes déclivités (supérieures à 2 p. 100) toutes les fois que le coefficient de traction en palier n'est pas trop élevé par rapport à l'effort dû aux rampes ; elle est surtout à recommander dans la traction par accumulateurs, lorsqu'elle permet, en réduisant la charge, de diminuer le poids des batteries.

On a objecté, il est vrai, qu'en laissant les moteurs en service sur les pentes on augmente l'usure et par suite les frais d'entretien, ce qui doit venir en déduction du bénéfice réalisé en énergie. Mais, si l'on veut faire intervenir tous les éléments de la question,

on reconnaît que cette augmentation d'entretien est bien négligeable à côté de l'importante économie indirecte que la réduction de la consommation moyenne des voitures permet de réaliser en diminuant proportionnellement la puissance des machines de la station génératrice. Si l'on admet par exemple que les frais de traction d'un tramway se répartissent proportionnellement de la façon suivante :

Intérêt et amortissement de l'usine	11	p. 100
— — de la canalisation électrique. .	6	—
— — du matériel roulant.	13	—
Entretien de l'usine, de la canalisation et du matériel roulant.	28	—
Personnel de conduite.	12	—
Production de la force motrice	30	—
Total.	100	p. 100,

on voit qu'une économie de 10 p. 100 sur la consommation d'énergie entraîne sur le total non seulement une réduction de 3 p. 100 par le dernier élément de dépense, mais aussi une réduction de 1,1 p. 100 par le premier, sans compter la diminution correspondante des frais d'entretien de l'usine.

Récupération aux arrêts. — Dans les services à arrêts fréquents, par exemple sur les métropolitains, où l'accélération absorbe à elle seule plus de 30 p. 100 de la dépense totale d'énergie et où, comme nous l'avons dit plus haut, la force vive ainsi accumulée ne peut être utilisée qu'en très faible partie avant l'arrêt suivant, il y aurait également grand intérêt à employer la récupération pendant le ralentissement, en freinant par des moteurs à excitation indépendante, au lieu de se servir de freins mécaniques. Dans ce cas, la f. é. m. des moteurs s'abaissant proportionnellement à la vitesse, il faudrait disposer le régulateur de façon à mettre les moteurs en série et en même temps à renforcer leur excitation. Par exemple, si le véhicule ou le train comporte 4 moteurs, on pourrait, en les couplant en série par 2, puis par 4, renvoyer du courant à la ligne tant que la vitesse ne serait pas tombée au-dessous du 1/4 environ de la vitesse de régime ; de même sur

les voitures à accumulateurs, on découplerait ceux-ci en deux demi-batteries (p. 269).

En appelant V la vitesse avant l'arrêt, V′ la vitesse de régime, généralement peu supérieure à V, sur la même déclivité, et P′ le poids d'inertie du train, l'énergie mécanique qu'on pourra ainsi utiliser pour la récupération sera

$$\frac{P'}{g}\left[V^2 - \left(\frac{V'}{4}\right)^2\right] = \frac{15}{16}\,\frac{P'}{g}\,V^2 \text{ sensiblement ;}$$

les moteurs travaillant à ce moment en pleine charge et sans addition prolongée de rhéostats, le rendement η' obtenu à la récupération sera élevé et plutôt supérieur à ce qu'il est pendant le démarrage.

En prenant $\eta\,\eta' = 0{,}63 \times 0{,}80 = 1/2$ sur les lignes à trôlet et 1/3 sur les lignes à accumulateurs, on sera suffisamment près de la vérité. On peut donc espérer récupérer dans le premier cas 7/16 et dans le second 5/16 de l'énergie perdue aux démarrages; en évaluant celle-ci à 30 p. 100 de l'énergie totale, la consommation sur la ligne s'abaisserait de 13 ou de 10 p. 100 respectivement, ainsi que la puissance moyenne de l'usine génératrice et des batteries qu'on peut y employer comme volants (p. 693). On voit tout l'intérêt que présenterait un essai d'application de cette méthode.

Une autre combinaison ingénieuse, proposée par M. Elihu Thomson pour arriver au même résultat, consisterait à remplacer les batteries des voitures par des batteries fixes placées aux stations, en dérivation sur la ligne de distribution; ces batteries emmagasineraient l'énergie produite par les moteurs au moment de l'arrêt pendant tout le temps qu'elle serait fournie à une tension supérieure à celle de la ligne. On voit qu'on gagnerait ainsi en simplicité et en légèreté pour les véhicules, mais qu'on perdrait en rendement sur la récupération, faute de pouvoir faire varier le groupement des accumulateurs lorsque la force électromotrice des moteurs tombe au-dessous de celle de la ligne.

CHAPITRE XV

FREINAGE DES VOITURES ÉLECTRIQUES

Il est essentiel pour la régularité et la sécurité de l'exploitation des tramways de pouvoir à volonté modérer ou annuler rapidement la vitesse des véhicules. C'est particulièrement une nécessité impérieuse avec les automobiles électriques, qui réalisent des vitesses très supérieures à celles des voitures à chevaux.

Sur les chemins de fer, l'emploi de moyens d'arrêt puissants s'impose a fortiori.

Nous allons passer en revue les principaux modes de freinage employés, en nous attachant plus particulièrement au matériel des tramways, qui est le moins connu, et renvoyant pour les freins de chemins de fer aux traités spéciaux[1].

§ 1. — Description et effets des moyens ordinaires de freinage (Freins a main)

Le freinage des voitures se fait habituellement en utilisant les effets du frottement, de manière à transformer en chaleur la force vive emmagasinée. On produit ce frottement, soit à la jante des roues, par des sabots qu'on appuie contre celles-ci, soit sur un tambour fixé à l'essieu et sur lequel on serre des cordes, soit enfin à la surface même des rails, par l'effet de patins qui viennent appliquer sur ceux-ci le poids de la voiture.

L'effort servant à l'application du frein peut être produit *à la*

[1] *Locomotive et matériel roulant* de M. M. Demoulin, *Cours de Chemins de fer* de M. Bricka, etc.

main : c'est le cas le plus général sur les tramways. Il peut aussi être produit *mécaniquement*, comme dans les freins continus employés sur les trains de chemins de fer.

Nous commencerons par nous occuper des freins à main, qui font l'objet du présent paragraphe.

Freins à sabots. — Le plus répandu de beaucoup de tous les freins à main est le frein à sabots.

Il se compose de sabots, généralement en métal, qui au moyen d'une transmission de mouvement appropriée, appelée timonerie, peuvent venir s'appliquer sur le bandage des roues.

On exerce l'effort sur cette timonerie, soit directement à la main, soit par entraînement en utilisant pour le serrage la force vive de la voiture.

Freins à commande directe. — Dans les freins à sabots commandés directement, l'appareil servant à transmettre l'effort musculaire du mécanicien à la timonerie est constitué, soit par un treuil à manivelle sur lequel s'enroule la chaîne de commande, soit par une vis et une manivelle ou un volant, soit encore par un simple levier à poignée ou à pédale. La timonerie se compose d'un système de leviers qui amplifient dans un rapport déterminé (généralement voisin de $\frac{1}{10}$) l'effort transmis par l'appareil moteur.

La disposition des sabots et de la timonerie varie suivant les constructeurs et le type de voiture. Il nous suffira de décrire l'une des plus répandues, celle du frein américain à chaîne et à palonniers compensateurs, dont la figure 894 montre un exemple caractéristique.

Ce frein est parfaitement symétrique. Les quatre sabots, attachés par paires à deux traverses horizontales, sont suspendus au truck et non à la caisse, de façon à venir s'appliquer bien exactement contre le bandage des roues, quelle que soit la charge de la voiture ; l'usure est ainsi rendue uniforme sur toute leur surface [1]. Ces sabots sont munis de ressorts de rappel, qui permettent de placer tous les patins rigoureusement à la même distance des bandages et de rattraper l'usure. Le frein se manœuvre indifféremment de l'une ou l'autre plate-forme, à l'aide d'une manivelle mettant en mouvement un arbre vertical muni à son extrémité inférieure d'un barillet sur lequel s'enroule une chaîne ; celle-ci entraîne une tringle articulée à l'extrémité d'un levier qui exerce directement son effort sur la traverse porte-sabots. Pour que le serrage des quatre

[1] La suspension à la caisse aurait de plus l'inconvénient de supprimer le jeu des ressorts dès que les freins seraient serrés.

sabots s'opère simultanément avec une égale pression sur les quatre roues. chacun des deux leviers de la timonerie prend son point d'appui sur une bielle courte articulée d'autre part au milieu d'un palonuier horizontal; les

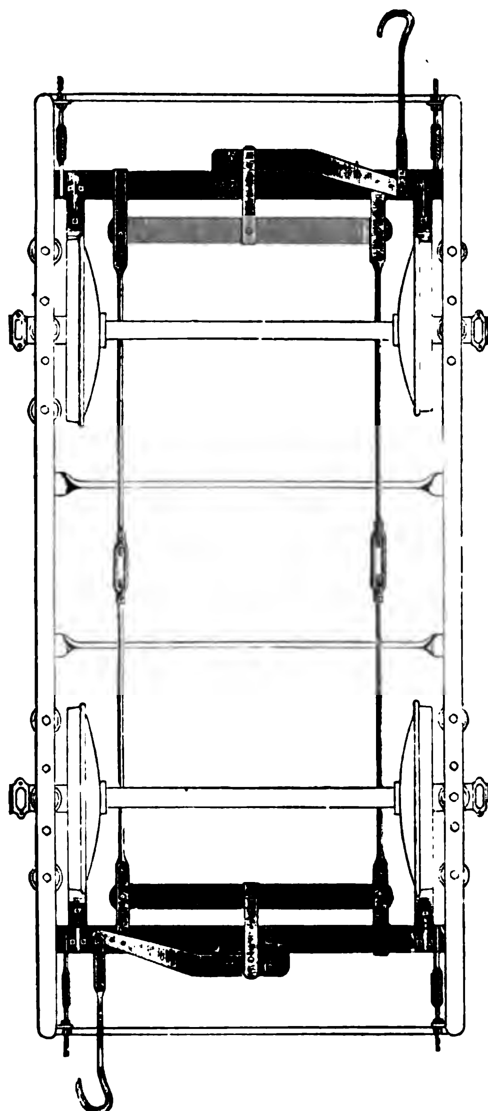


Fig. 894. — Disposition ordinaire de la timonerie d'un frein à sabots américain.

deux palonniers sont reliés entre eux par des tirants disposés de façon à ne pas empiéter sur la place réservée aux moteurs; des écrous à filets contraires, placés au milieu de ces tirants, permettent de remédier au jeu qui se produit toujours après quelque temps de service. Pendant que la traction s'exerce sur l'une des chaines, l'autre est tenue par un encliquetage monté sur le pied de

l'arbre correspondant. Du côté du serrage, un encliquetage identique sert à maintenir les sabots en contact avec les roues sans que le mécanicien ait besoin de faire effort sur sa manivelle; il suffit ensuite de relever le cliquet avec le pied pour que l'élasticité des différentes pièces de la transmission, jointe à celle des ressorts de rappel, fasse dérouler la chaine.

Les extrémités des traverses de sabots se meuvent dans des glissières ajustables qui assurent un guidage précis et sans jeu; quant aux palonniers, ils sont guidés par des étriers prolongeant les tirants de rappel et qui viennent embrasser les traverses.

Lorsqu'une automobile remorque une autre voiture pourvue du même système de freins, on peut très facilement relier ensemble les timoneries des deux véhicules de façon à les rendre manœuvrables simultanément à l'aide d'une seule manivelle : il suffit, par exemple, d'attacher la chaine de commande de l'automobile à la chape d'une poulie de renvoi, sur la gorge de laquelle s'enroule une chaine auxiliaire fixée d'une part au levier de serrage des freins de l'automobile et de l'autre à la chaine de commande de la voiture d'attelage.

La disposition que nous venons de décrire est l'une des plus usuelles ; mais on conçoit que les combinaisons de leviers peuvent varier à l'infini : on en a déjà vu un certain nombre d'exemples au chapitre VI. Il y a seulement un certain nombre de conditions générales à remplir : ce sont, avant tout, une grande rapidité d'action, des organes simples et robustes, des sabots faciles à ajuster et à remplacer et montés de telle sorte qu'ils ne soient pas influencés par les oscillations de la caisse ; il faut aussi que les leviers et tringles de commande soient disposés de manière à ne pas empiéter sur l'espace réservé aux moteurs et à répartir la pression des sabots également sur toutes les roues.

Une difficulté spéciale se présente dans les voitures à bogies, où la timonerie doit permettre le déplacement relatif des deux trucks. On peut, dans ce cas, employer par exemple la disposition représentée par la figure 301 (t. I, p. 328) : un balancier central, placé sous le milieu de la caisse et qui peut être indifféremment tiré par deux tiges aboutissant respectivement aux deux chaines de manœuvre, commande par un système de tirants à point d'attache variable deux autres balanciers agissant chacun sur les sabots du truck correspondant.

Au lieu d'un seul sabot par roue, certaines voitures en comportent deux, diamétralement opposés et venant s'appliquer simultanément contre le bandage ; cette disposition a l'avantage de ne pas créer de pression sur les plaques de garde et de ne pas tendre à soulever le truck par l'intermédiaire des tiges de suspension, comme font les freins à un seul sabot.

Les sabots de frein sont généralement en fonte, non en fonte trempée, qui « prendrait » mal sur la roue, mais en fonte grise ordinaire. Cependant certaines compagnies emploient de préférence des sabots en fonte dont le corps est percé d'alvéoles où sont encastrés des morceaux de bois, de liège, de fer ou d'acier, ou bien formé d'une coquille remplie d'une composition métallique plastique, soit même des sabots entièrement en fer ou en acier. Mais l'emploi de sabots qui ne résistent davantage à l'usure qu'en accroissant celle de la jante des roues n'est pas à recommander, d'autant plus qu'en général les métaux plus durs prennent moins bien sur les roues.

Pour empêcher l'usure inégale du bandage, il convient de faire porter

les sabots à la fois sur le chemin de roulement et sur le boudin des roues.

La figure 895 montre un sabot de sûreté en fonte, traversé par un fil de fer qui a pour but d'empêcher les morceaux de tomber en cas de rupture et d'occasionner ainsi des accidents.

Fig. 895. — Sabot de sûreté

Dans tous les freins américains, les sabots sont montés de façon à pouvoir être très facilement remplacés; il suffit, en général, pour cela d'enlever une clavette, et il n'y a pas d'écrou à desserrer. Les figures 896 et 897 montrent des exemples de montage de sabot; dans le second, la suspension est élastique et tient lieu de ressort de rappel.

On sait que, pour obtenir un bon freinage, il faut que les sabots appuient aussi fortement que possible sur la jante des roues sans cependant les bloquer. Pour réaliser automatiquement cet effet, certains constructeurs ont imaginé d'interposer entre le sabot et sa traverse un ressort à lame de la force voulue (fig. 898).

En ce qui concerne la commande de la timonerie des freins, en dehors de la commande par treuil et manivelle, qui est la plus usitée, on emploie aussi, comme nous l'avons dit et spécialement en Europe, la vis ou même le simple levier qui donne une manœuvre très rapide.

Parmi les perfectionnements apportés aux organes de manœuvre, nous mentionnerons les manivelles à rochet (fig. 899), qui permettent au mécanicien de ramener toujours sa poignée dans la position la plus favorable pour exercer l'effort.

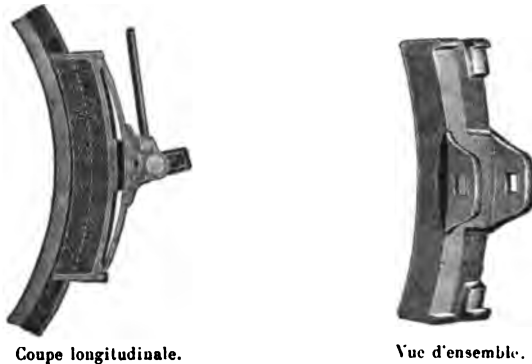
Support. Clavette. Sabot.

Fig. 896. — Détails de la suspension d'un sabot.

Fig. 897. — Sabot à suspension élastique.

Freins à entraînement. — Le plus connu et pour ainsi dire le seul usité en France des freins à entraînement est le frein

Lemoine, employé depuis 1882 par la Compagnie générale des Omnibus et l'administration des Postes. C'est à proprement parler un frein mixte, qui utilise le serrage de cordes enroulées sur l'essieu principalement pour l'application des sabots contre les ban-



Coupe longitudinale. Vue d'ensemble.

Fig. 898. — Sabot Kinzer.

dages et accessoirement pour produire sur cet essieu un effort retardateur.

Le principe en est le suivant : un palonnier disposé en avant de l'essieu est commandé par une tige de traction attachée en son

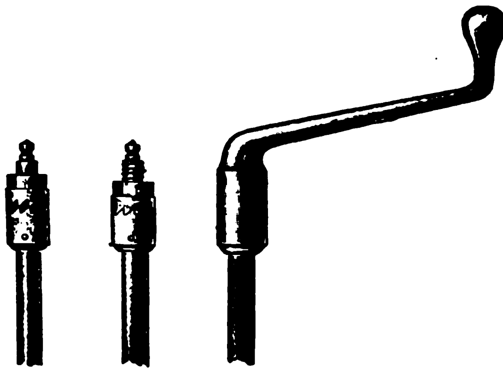


Fig. 899. — Manivelle à rochet.

milieu ; à chacune des extrémités de ce levier est fixée une tringle en fer, reliée au petit bout d'une corde conique en chanvre qui s'enroule sur une poulie clavetée sur l'essieu contre la roue. La corde fait 2 ou 3 tours, suivant les cas, et son gros bout, terminé par une boucle solidement fermée, est relié à la traverse porte-

Coupe longitudinale.

Plan.

Fig. 900. — Disposition des freins Lemoine sur une voiture électrique de la Cie des tramways de Paris et du département de la Seine (lignes de Courbevoie et de Levallois).

sabots. En marche, les spires de la corde sont assez lâches pour laisser tourner librement l'essieu ; mais si, à l'appel du mécanicien, le palonnier est sollicité vers l'avant, les spires se tendent autour de la poulie et le gros bout de la corde, attirant à lui la traverse porte-sabots, amène ces derniers en contact avec le bandage des roues.

Pour éviter que la corde soit trop rapidement mise hors de service, on la garnit de coussinets en bois qui sont en contact avec la poulie ; ces coussinets sont répartis sur la dernière spire du côté du gros bout, c'est-à-dire sur la partie qui travaille le plus; indépendamment de leur action préservatrice, ils présentent l'avantage d'augmenter le diamètre de la spire de la corde et par suite de diminuer le rapport du rayon de la roue au bras de levier de la force employée à produire l'arrêt.

Pour freiner convenablement une automobile, il faut employer deux cordes par essieu, ainsi que le montre, par exemple, la figure 900.

Mais cela ne suffit pas encore, car, sous cette forme simple, le frein Lemoine ne peut servir au recul, et sur les voitures de la Compagnie des Omnibus on a dû pour cette raison ajouter une béquille destinée à maintenir la voiture sur les pentes. Il est préférable d'ajouter un second système de cordes enroulées en sens inverse des premières.

Comme exemple de ce dispositif, dû à M. Chalou, nous citerons l'application qui en a été faite sur les voitures du tramway funiculaire de Belleville[1]. La figure 901 donne le schéma de l'appareil. Une pédale A, au pied du mécanicien, commande une tige B, qui, par l'intermédiaire du levier C, fait tourner un arbre horizontal D perpendiculaire à l'axe de la voiture ; sur cet arbre est calé de chaque côté de l'axe un levier E qui, au moyen d'une seconde tige F, commande une traverse G articulée à deux tringles H et H' ; celles-ci agissent à leur tour sur deux palonniers K et K', à chaque extrémité desquels sont attachées deux cordes coniques enroulées en sens contraire autour de deux manchons fixés sur l'essieu correspondant et dont les gros bouts sont reliés par deux crochets L et L' au sabot S.

Supposons la voiture roulant vers la gauche ; lorsque le mécanicien appuie le pied sur la pédale A, la traction exercée par les palonniers K et K' a pour effet de faire adhérer les cordes supérieures sur leurs manchons, dont la rota-

[1] Cf. Le tramway funiculaire de Belleville, par M. Widmer, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1893, 1er semestre.

tion entraîne vers la gauche les crochets L, et les sabots viennent se serrer contre les roues. Si la voiture roulait en sens inverse, ce serait les cordes inférieures, enroulées sinistrorsum, qui seraient entraînées par les manchons et qui serreraient les sabots en tirant les crochets L'.

L'autre plate-forme porte une pédale semblable A', qui, par l'intermédiaire

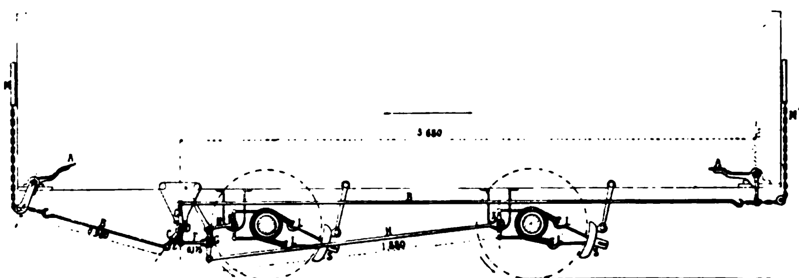


Fig. 901. — Frein funiculaire à double effet.

d'une tringle B' et d'un levier C', commande de même l'arbre D et les organes suivants.

Lorsque la voiture doit rester arrêtée pendant un certain temps sur une pente, au lieu de conserver le pied sur la pédale, on cale les freins en levant, à l'aide d'un levier qu'on peut fixer sur un secteur denté, une chaînette M (ou M') commandant la tige B (ou B').

Lorsqu'on veut remettre la voiture en marche, on cesse d'appuyer sur la pédale ou l'on abaisse le levier dont nous venons de parler, et des ressorts à

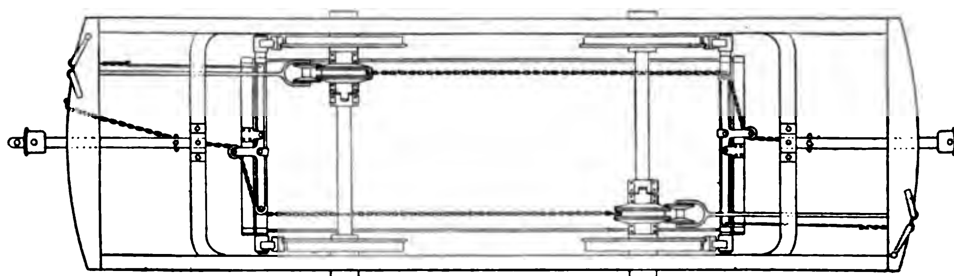


Fig. 902. — Frein d'entraînement Prouty-Noble.

boudin ramènent en arrière les tiges qui ont servi à serrer les cordes sur les manchons des essieux ; ces manchons tournent alors librement sans entraîner les cordes.

La figure 902 montre un autre frein d'entraînement, à commande par manchons d'embrayage, qui est employé en Amérique et présente l'avantage de pouvoir fonctionner dans les deux sens : une poulie folle est montée sur chaque essieu ; cette poulie est comprise entre deux disques de friction, dont l'un est calé à demeure sur son arbre et l'autre rendu solidaire de cet arbre par un clavetage qui lui permet un certain déplacement latéral ; en serrant ce dernier contre la poulie folle au moyen d'un levier d'embrayage, on détermine

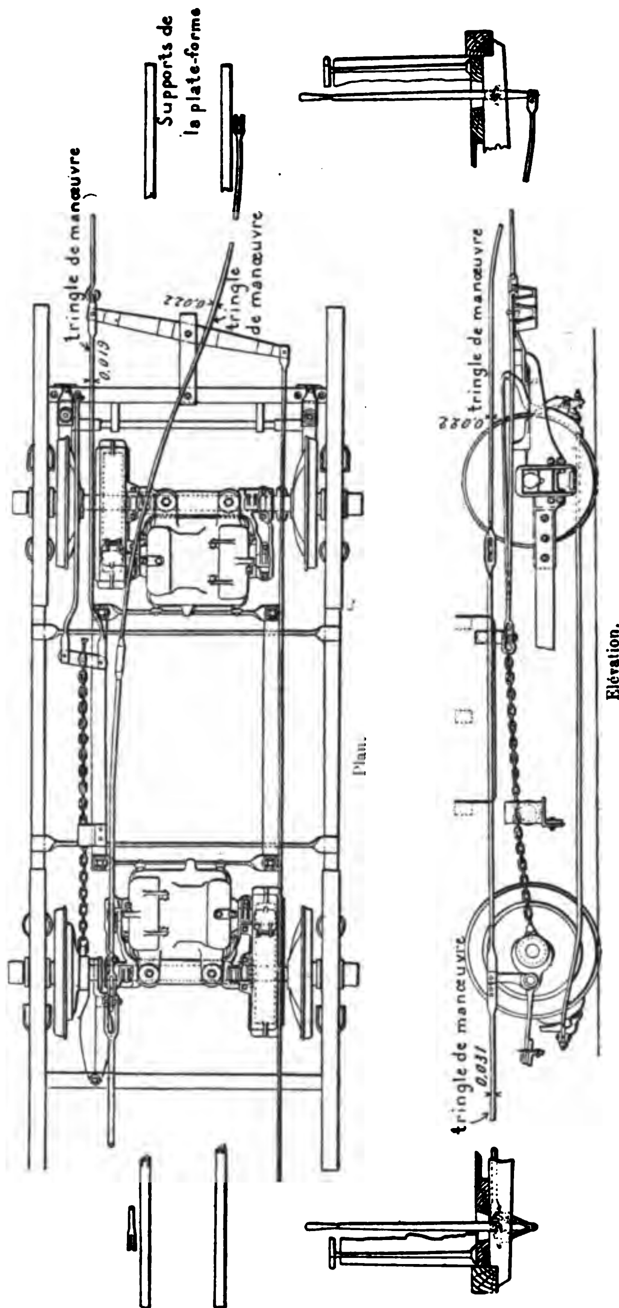


Fig. 903. — Ensemble du frein d'entraînement du Chicago City Railway.

l'entraînement de cette poulie par l'essieu et par suite l'enroulement de la chaîne de commande des sabots qui y est attachée.

Nous mentionnerons encore dans la même catégorie un frein employé sur le Chicago City Ry (fig. 903). Il se compose essentiellement, comme le précédent, d'une poulie folle sur l essieu, à laquelle est fixée l'extrémité de la chaine de commande de la timonerie et qu'on peut solidariser avec son axe par un embrayage à friction. Cette poulie, en fonte, tourne sur un manchon en acier coulé, claveté sur l'essieu et muni d'une collerette extérieure, et présente une large face plane annulaire, qui vient frotter contre une portée semblable ménagée sur la roue adjacente (fig. 904) ; une rondelle en cuir est interposée entre les deux surfaces frottantes. La pression servant à appliquer la poulie contre la roue est produite par une sorte d'étau (fig. 905) dont les branches embrassent la partie de la poulie contiguë à la collerette

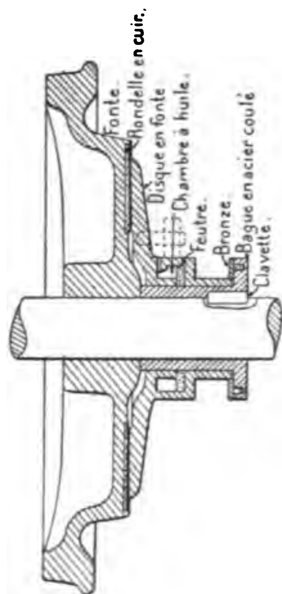


Fig. 904. — Frein du Chicago City Railway. — Coupe suivant l'axe de l'essieu.

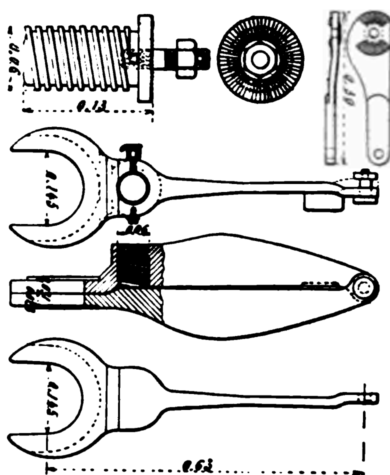


Fig. 905. — Frein du Chicago City Railway. — Détails de l'étau, de la vis et de la manivelle de serrage.

et qu'on ouvre à volonté à l'aide d'une vis à double filet mue par une petite manivelle, une tringle et un levier à la main du mécanicien. La commande de la vis est munie d'un dispositif de rattrapage de jeu ; tous les paliers sont soigneusement lubrifiés. L'ensemble n'occupe que 0,16 m. de longueur sur l'arbre, ce qui est une considération importante pour des automobiles électriques, où les moteurs laissent fort peu de place disponible sur l'essieu. L'action de ce frein est très douce et il s'applique parfaitement, comme le montre la figure 903, à la commande des freins d'une voiture remorquée.

On verra enfin plus loin, dans le paragraphe relatif aux freins électriques, un type de frein à entraînement où intervient l'électricité, le frein Achard.

Autres freins appliqués à l'essieu. — Les types de freins précédents sont susceptibles de nombreuses variantes. Par exemple, on

pourrait construire un frein sans sabots, à corde, en enroulant celle-ci sur un tambour de grand diamètre calé sur l'essieu.

On a employé aussi un tambour de ce genre muni d'une gorge dans laquelle on serre des coins en bois opposés suivant un diamètre. Si l'on appelle α le demi-angle des coins, N la pression avec laquelle on les rapproche l'un vers l'autre, f' le frottement du bois contre le fer (0,42), la pression appliquée contre les parois de la rainure normalement à ces parois a pour expression, d'après la théorie du coin,

$$p = \frac{N}{2(\sin\alpha + f'\cos\alpha)},$$

et l'effort retardateur tangentiellement à la circonférence moyenne de frottement est pour les deux coins

$$F = 4f'p = \frac{2f'N}{\sin\alpha + f'\cos\alpha}.$$

Les coins produisent donc par eux-mêmes une amplification importante de l'effort.

Ce frein a été employé par M. Claret sur les voitures électriques de Clermont-Ferrand (fig. 240, t. I, p. 267).

Freins à patins. — Les freins à patins ne s'emploient d'ordinaire que comme freins de secours. Ils sont constitués par de simples sabots, généralement en bois, actionnés par un jeu de leviers; le mouvement de ces leviers fait abaisser les sabots qui viennent appuyer fortement contre les rails, en produisant un freinage brutal, mais énergique.

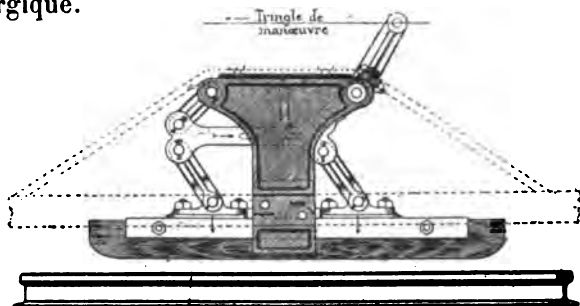


Fig. 906. — Frein à patins américain.

Les figures 906, 907 et 908 montrent différentes dispositions de freins à patins, sur lesquelles il nous paraît inutile d'insister, étant donné leur simpli-

cité. Des freins du même genre sont en service à Marseille, au Havre, etc.

Les freins à patins doivent, bien entendu, être fixés au truck et non à

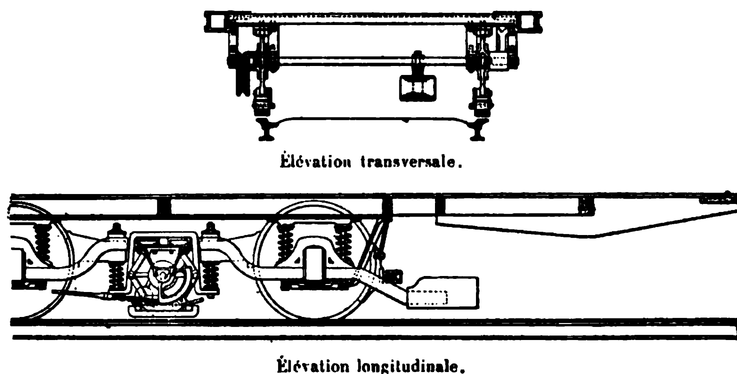


Fig. 907. — Autre type de frein à patins américain.

la caisse de la voiture, dont les oscillations et le chargement inégal rendraient leur action incertaine ; ils ne doivent en aucun cas pouvoir soulever la voiture au point de faire sortir les boudins de l'ornière.

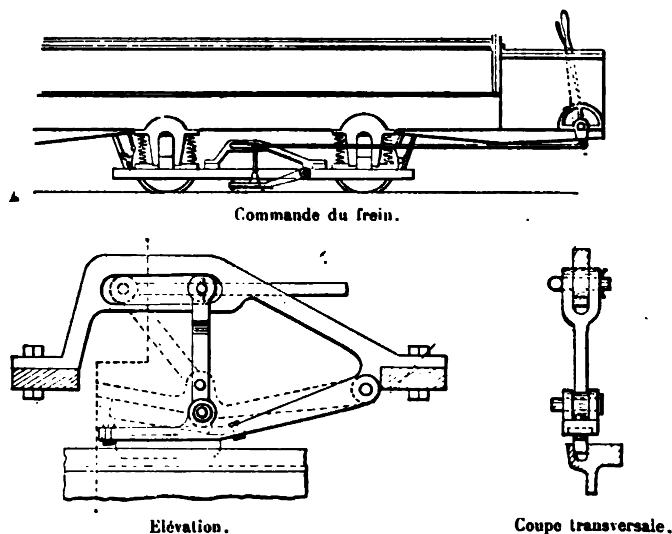


Fig. 908. — Frein à patins pour rails à gorge.

La figure 909 montre une combinaison de frein à patins et de frein à sabots dont la manœuvre se comprend à la seule inspection de la figure.

Conditions spéciales aux tramways électriques. — Les divers types de freins dont nous venons de donner la description ont suffi

pour les voitures à traction animale et peuvent rendre encore de bons services sur les voitures électriques. Mais il ne faut pas se dissimuler que le freinage de celles-ci exige une puissance beaucoup plus considérable.

Le poids des automobiles électriques est, en effet, plus élevé de 50 à 100 p. 100 que celui des anciennes voitures ; leur vitesse aussi est plus grande, souvent presque double : la puissance vive à annuler, $\frac{1}{2} M V^2$, est donc 4 à 8 fois plus considérable que par le passé.

D'autre part, l'emploi des automobiles permet d'établir des services à simple adhérence sur des voies à rampes plus fortes qu'au-

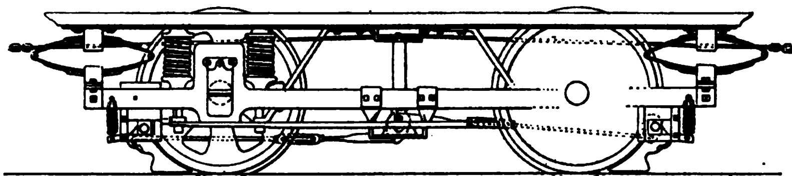


Fig. 909. — Frein mixte, à patins et sabots.

trefois, ainsi qu'on l'a vu plus haut (p. 495). Tandis qu'anciennement on ne dépassait guère des déclivités de 20 à 30 mm. par mètre, on rencontre aujourd'hui fréquemment sur les lignes électriques des pentes de 40 à 50 mm : m. A Remscheid, la pente dépasse 60 mm : m. sur une longueur de 350 m. et 100 mm : m. sur une longueur de 100 m. (fig. 910). A Lausanne, on atteint 113 mm : m. et au Havre, 115 mm : m. En Amérique, on rencontre fréquemment des déclivités de 80 mm : m. ; on y atteint même 120 et exceptionnellement 140 ou 145 mm : m. sur de faibles longueurs (fig. 911).

Sur ces pentes, l'accélération due à la pesanteur pendant la descente rend nécessaire de modérer la vitesse par les freins et augmente le travail que ceux-ci doivent absorber sur un parcours donné pour réaliser l'arrêt absolu. Leur puissance doit être augmentée d'autant.

On se rendra mieux compte de l'effet de ces divers facteurs par l'étude de l'équation du freinage.

Théorie du freinage. — Supposons d'abord que pendant l'action des freins il n'y ait aucun patinage des roues sur les rails. L'effet du frottement des patins, des sabots ou des cordes est alors toujours

équivalent à un effort de frottement appliqué sur le rail, que nous appellerons F. Cet effort équivalent est évidemment égal au pro-

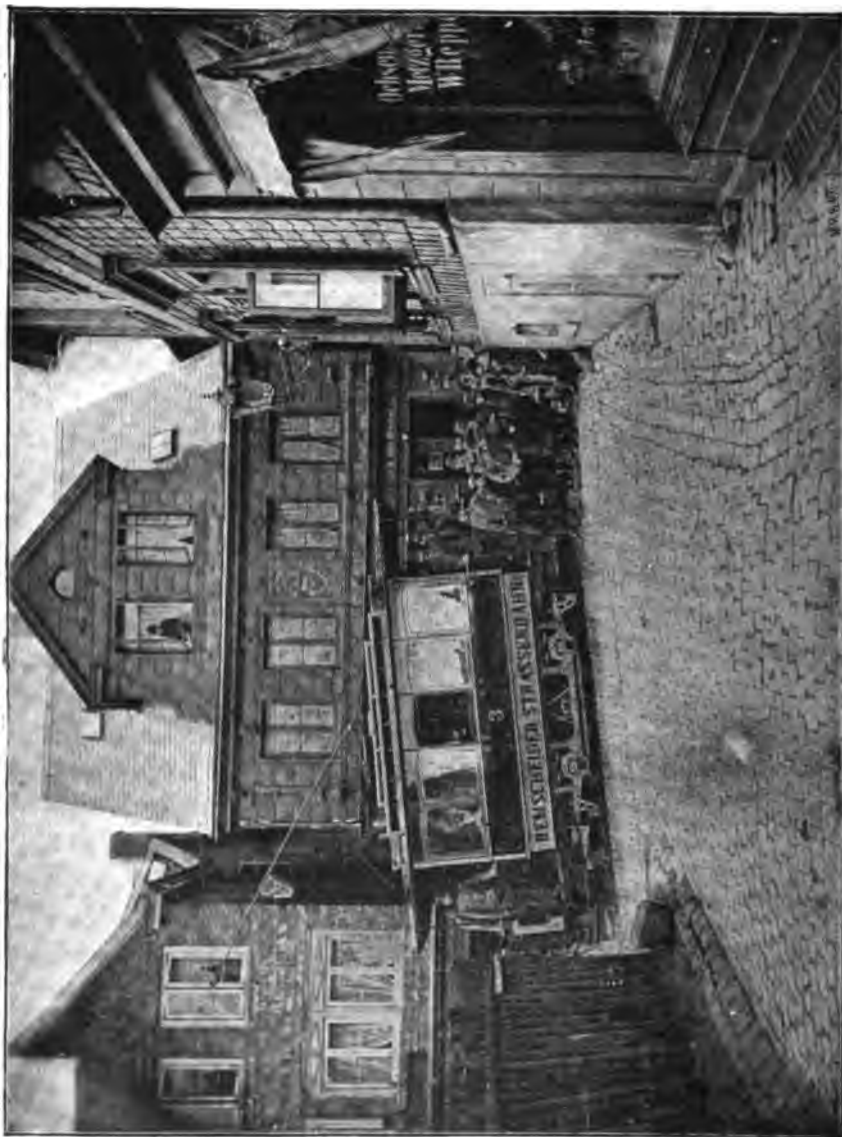


Fig. 910. — Automobile électrique gravissant une rampe de 10.6 p. 100 à Remscheid.

duit du coefficient de frottement au point où celui-ci a lieu par la pression appliquée normalement aux surfaces frottantes et par le rapport des chemins décrits d'une part par la voiture relativement

au rail et de l'autre par la surface frottée relativement au frotteur.

Par exemple, s'il s'agit d'un frein à sabots ou à coins agissant

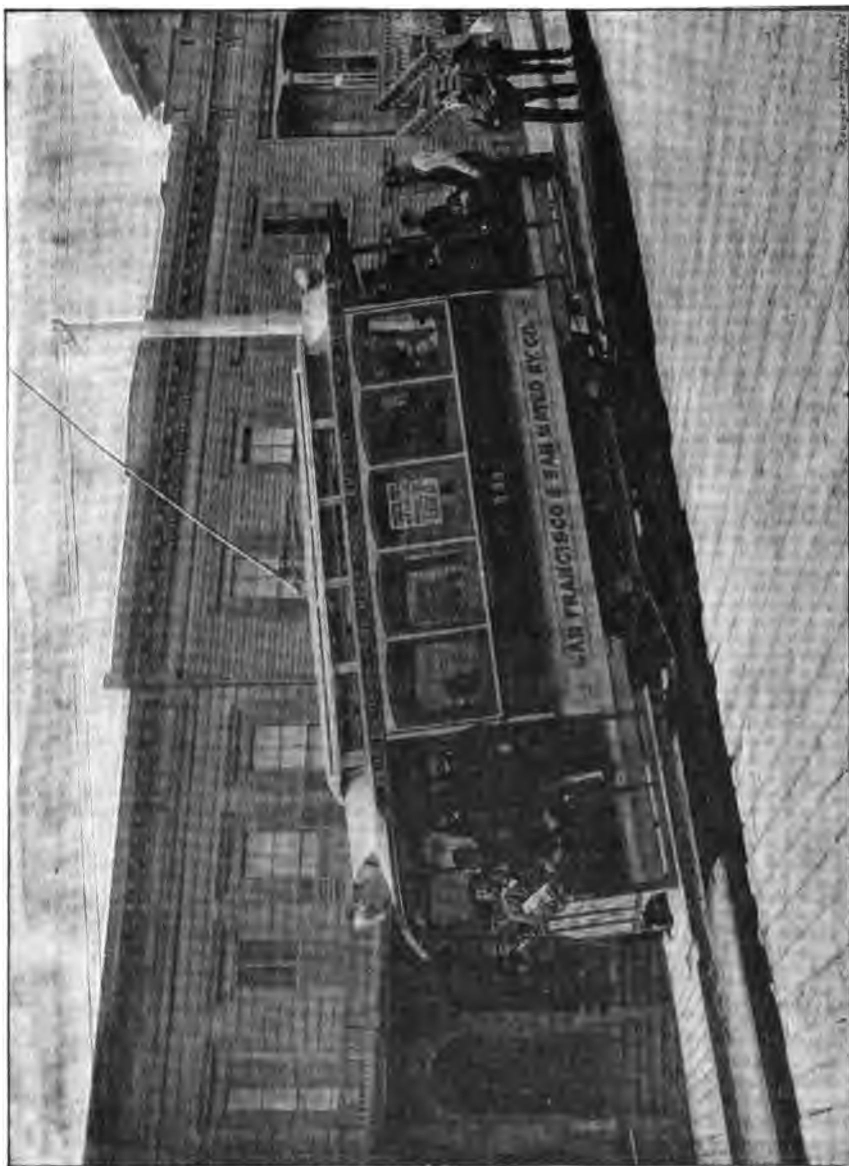


Fig. 911. — Automobile électrique gravissant une rampe de 14 p. 100 à San Francisco.

sur un tambour de diamètre d, calé sur l'essieu, avec une pression totale p par essieu et un coefficient de frottement f, l'effort F

reporté à la jante des roues est, pour l'ensemble des deux essieux,

$$F = 2 \frac{d}{D} fp.$$

Avec un frein à corde dans lequel le tambour sert principalement à tendre la corde pour appliquer les sabots contre les roues, l'effort qui correspond au frottement de la corde sur le tambour ne constitue qu'un appoint très faible à côté de l'effort des sabots.

Appelons T la tension exercée sur la corde par le mécanicien, T′ celle qu'exerce la corde sur les sabots, β l'angle de cette tension avec la normale à la roue au droit du sabot, φ l'angle d'enroulement de la corde sur l'essieu, d le diamètre de la circonférence de frottement, f' le coefficient de frottement correspondant; on aura comme effet des sabots sur chaque paire de roues

$$F = f T' \cos \beta = f T e^{f'\varphi} \cos \beta$$

et comme effet de la corde frottant sur l'essieu

$$F' = (T' - T) \frac{d}{D} f' = T (e^{f'\varphi} - 1) \frac{d}{D} f' = T e^{f'\varphi} \frac{d}{D} f' \text{ sensiblement.}$$

L'effort total de freinage à la jante des roues est par suite

$$2 (F + F') = 2 T e^{f'\varphi} \left(f \cos \beta + \frac{d}{D} f' \right).$$

Cela posé, appelons P le poids total de la voiture, y compris les roues et essieux, δ l'angle d'inclinaison du profil en long sur une pente i où se fait le freinage, x l'espace parcouru jusqu'à un instant t compté à partir de la mise en action des freins, v la vitesse de la voiture à cet instant, v_0 la vitesse initiale au moment du freinage. Nous supposerons que, suivant l'usage, tous les essieux sont freinés à la fois pour utiliser l'adhérence totale et nous pourrons raisonner comme s'il n'y en avait qu'un supportant le poids total de la voiture. L'équation des quantités de mouvement appliquée à la masse de la voiture, à laquelle nous attribuerons, comme dans les deux chapitres précédents, un poids fictif P′, dit *poids d'inertie*[1], comprenant l'effet des masses

[1] Voir le calcul de ce poids, p. 517.

animées d'un mouvement de rotation (essieux, roues, armatures), est

$$\frac{P'}{g} dv = (P \sin \delta - F \cos \delta)\, dt. \qquad (105)$$

Nous admettrons d'abord à titre d'approximation qu'on donne à l'effort de frottement F une valeur constante égale à la moyenne de celles qu'il prend pendant l'arrêt. Dans cette hypothèse, l'intégration donne immédiatement

$$\frac{P'}{g} (v - v_0) = (P \operatorname{tg} \delta - F)\, t \cos \delta$$

ou, en remplaçant tg δ par sa valeur i et approximativement cos δ par l'unité,

$$v - v_0 = g \frac{P}{P'} \left(i - \frac{F}{P}\right) t.$$

L'espace x parcouru depuis la mise en action des freins est

$$x = \int_0^t v dt = \int_{v_0}^{v} \frac{v}{g \frac{P}{P'} \left(i - \frac{F}{P}\right)} dv = \frac{v_0^2 - v^2}{2g \frac{P}{P'} \left(\frac{F}{P} - i\right)}.$$

L'arrêt se produit au bout d'un parcours X tel que $v = 0$, c'est-à-dire

$$X = \frac{P'}{P} \frac{v_0^2}{2g \left(\frac{F}{P} - i\right)}. \qquad (106)$$

Si la pente est forte, cos δ diffère sensiblement de l'unité,

$$\cos \delta = \sqrt{\frac{1}{1 + i^2}},$$

et l'on peut, pour plus d'exactitude, écrire

$$X = \frac{v_0^2}{2g} \frac{P'}{P} \frac{\sqrt{1 + i^2}}{\frac{F}{P} - i}. \qquad (107)$$

L'arrêt sera donc, comme c'était évident a priori, d'autant plus rapide que le poids de la voiture et sa vitesse seront plus faibles et que l'effort résistant dû au frottement F sera plus grand.

Cet effort F est limité par des conditions indépendantes de la puissance dont dispose le mécanicien.

S'il s'agit d'un frein à patin donnant sur le rail un coefficient de frottement f, on a nécessairement

$$F = Pf.$$

S'il s'agit de freins à sabots ou à corde, le maximum qu'on puisse réaliser pour F sera l'effort pour lequel les roues qui y sont soumises seront sur le point de commencer à patiner. Supposons, en effet, qu'on dépasse cette valeur ; la roue sera bloquée par le frein et glissera sur le rail au lieu de rouler, et l'on sait que dans ces conditions le coefficient de frottement s'abaisse dans de fortes proportions, même si le patinage ne dure qu'un instant extrêmement court.

Cet effet bien connu a une telle importance pratique que, sur les grandes pentes de San Francisco dont nous avons déjà parlé à diverses reprises, les mécaniciens, tout en serrant leurs freins, maintiennent les moteurs en action sur la touche de demi-vitesse pour empêcher le calage des roues ; c'est grâce à cette précaution qu'ils peuvent aborder avec sécurité des pentes de 145 mm : m.

Les freins devront donc toujours être serrés de façon que les roues continuent à tourner, tout en réalisant à leur jante un effort presque égal à l'adhérence du véhicule, c'est-à-dire, en appelant a le coefficient d'adhérence et ε une très petite fraction de l'unité,

$$F = (1 - \varepsilon)Pa.$$

En substituant les valeurs maxima de F, on obtient les parcours minima en mètres nécessaires pour l'arrêt :

$$X = \frac{P'}{P} \frac{v_0^2}{2g} \frac{\sqrt{1 + i^2}}{f - i}, \text{ lorsque les roues sont bloquées,} \qquad (108)$$

$$X = \frac{P'}{P} \frac{v_0^2}{2g} \frac{\sqrt{1 + i^2}}{a - i}, \text{ lorsqu'il n'y a aucun patinage,} \qquad (109)$$

v_0 étant exprimé en m : s. Lorsque les roues patinent partiellement, les valeurs sont intermédiaires.

Avec les freins à frottement ordinaires, on ne peut régler la pression des sabots ou des cordes avec une précision suffisante pour arriver à la limite d'adhérence sans la dépasser ; il est alors prudent de tabler seulement sur les résultats de la première for-

mule. On verra plus loin qu'il en est autrement avec les freins électriques.

Le frein à patin est supérieur aux freins à sabots lorsqu'ils sont bloqués, parce que le coefficient f peut être plus élevé que celui des roues sur les rails.

Effet de la variation du coefficient de frottement avec la vitesse. — Dans ce qui précède, nous avons supposé constant le coefficient de frottement des freins. En réalité, il varie avec la vitesse, comme l'ont établi plusieurs expérimentateurs, particulièrement Poirée et M. Douglas Galton [1].

Ce dernier a trouvé que le coefficient de frottement de sabots en fonte ou en fer contre des bandages en acier est fonction de la vitesse et varie avec la durée de l'application, et que le coefficient de frottement entre des bandages en acier et des rails en fer ou en acier, bien qu'indépendant du temps d'application, varie avec la vitesse.

Le tableau suivant résume les résultats de ses expériences :

FROTTEMENT contre des roues à bandage d'acier	VITESSE TANGENTIELLE		COEFFICIENT DE FROTTEMENT			
	en kilomètres à l'heure	en mètres par seconde	pendant les 3 premières secondes	au bout de 5 à 7 secondes	au bout de 12 à 15 secondes	au bout de 20 à 26 secondes
Sabots en fonte	96	26,66	0,062	0.054	0,048	0,043
	80	22,22	0,100	0,070	0,056	
	72	20	0,125			
	64	17,77	0,134	0,100	0,080	
	48	13,33	0,184	0,110	0,098	
	32	8,88	0,205	0,175	0,128	0,070
	16	4,44	0,320	0,209		
	8	2,22	0,360			
Sabots en fer	87	24,16	0,110			
	50	13,88	0,129	0,11	0,099	
	25	6,94	0,170			
Rails en acier	80	22,22	0,040			
	72	20	0,051			
	61	16,94	0,057	0,044	0,044	
	40	10,10	0,080	0,074		
	24	6,66	0,087			
	16	4,44	0,110			

Le coefficient de frottement diminue, comme on le voit, après un certain temps, par suite soit d'une lubrification produite par la limaille métallique

[1] « Railway brakes », *Proc. Inst. Mech. Eng.*, juin et octobre 1878; *British Association*, Dublin, 1878.

entrainée par les roues, soit de l'échauffement des surfaces frottantes. Le frottement des sabots en fonte contre les roues est bien plus élevé que celui des roues sur les rails; dans ce dernier cas, le patinage se produit à partir d'un coefficient de 0,24 à 0,28 environ; les roues, qui conservent leur vitesse jusqu'à ce moment, se calent aussitôt, si l'on emploie les moyens de freinage ordinaires (le calage a lieu par exemple en 0,3 seconde à la vitesse de 96 km : h.), et le coefficient de frottement tombe en même temps à 0,04; le parcours d'arrêt se trouve alors considérablement augmenté.

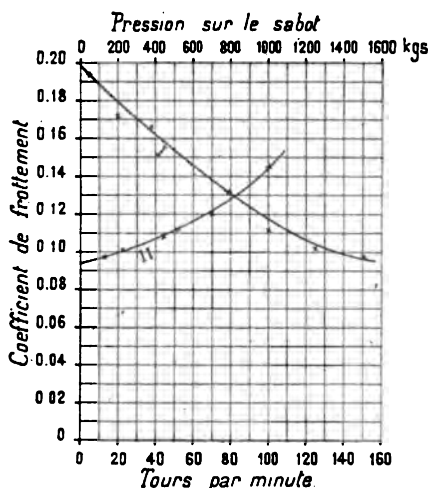


Fig. 912. — Courbes représentant la variation du coefficient de frottement d'après les expériences de M. Sperry.

I, frottement en fonction de la vitesse. — II, frottement en fonction de la pression sur le sabot.

Les nombres du tableau relatifs au frottement des sabots sont bien supérieurs à ceux obtenus par M. Sperry[1] avec des sabots en fonte frottant sur des roues en fonte trempée de 0,84 m. et qui sont résumés par la courbe I (fig. 912) : en effet, à vitesse nulle, le chiffre de Sperry est de 0,20 et, à la vitesse de 120 tours ou $\frac{120}{60} \times 0,81 = 1,62$ m : s., il atteint seulement 0,104.

Ces variations du coefficient du frottement peuvent se représenter analytiquement par des formules empiriques. Celle qui paraît la plus rationnelle est une formule exponentielle de la forme

$$f = f_0 \, e^{-mv}.$$

Celle-ci représente, par exemple, la courbe de Sperry en posant

$$f = 0,20 \quad \text{et} \quad m = 0,038.$$

Mais il est plus simple de se contenter d'une formule linéaire permettant une intégration plus facile, en posant

$$f = f'_0 \, (1 - nv);$$

d'où

$$F = F_0 \, (1 - nV),$$

F_0 et n étant deux constantes. Pour les expériences de Sperry, en exprimant V en mètres par seconde, on trouve, par exemple, sensiblement, entre les vitesses de 0 et 8 km : h.,

$$f = f_0 \, (1 - 0,25 \text{ V}) = 0,20 - 0,05 \text{ V}.$$

[1] « The electric brake in practice », *Trans. Am. Inst. El. Eng.*, 19 septembre 1894.

L'équation différentielle s'écrit alors

$$\frac{P'}{g}\,\frac{dv}{P\,\mathrm{tg}\,\delta - F_0 + nF_0 v} = \cos\delta\,dt,$$

d'où

$$t = \frac{P'}{nF_0 g\cos\delta} \times \log\text{ nép}\,\frac{nF_0 v + P\,\mathrm{tg}\,\delta - F_0}{nF_0 v_0 + P\,\mathrm{tg}\,\delta - F_0}.$$

On peut encore en déduire l'espace parcouru en intégrant le produit Vdt. Mais on est ainsi conduit à des calculs trop compliqués pour la pratique. Les variations de vitesse sur les tramways sont d'ailleurs assez faibles pour qu'on puisse se contenter d'une valeur moyenne pour f, par exemple $f = 0{,}14$.

Sur les chemins de fer, le calcul précis présente plus d'intérêt. On peut le faire comme il suit, en tenant compte aussi de la durée du serrage t.

D'après M. Soulerin [1], les résultats trouvés par M. Douglas Galton peuvent se mettre sous la forme

$$f = (0{,}26 - 0{,}0072\,v)\,(1 - 0{,}032\,t).$$

En portant cette valeur dans l'équation précédente et faisant approximativement $\cos\delta = 1$, $\sin\delta = i$, on trouve par intégration

$$t - 0{,}016\,t^2 = \frac{P'}{g \times 0{,}0072\,p}\log\text{ nép}\,\frac{0{,}26 - 0{,}0072\,v + \frac{P}{p}i}{0{,}26 - 0{,}0072\,v_0 + \frac{P}{p}i},$$

p désignant toujours la pression totale sur les freins.

D'où

$$t = 31{,}25 - \sqrt{(31{,}25)^2 - 871\,\frac{P'}{p}\log\text{ nép}\,\frac{0{,}26 - 0{,}0072\,v + \frac{P}{p}i}{0{,}26 - 0{,}0072\,v_0 + \frac{P}{p}i}}.$$

La valeur de P' peut s'évaluer approximativement en majorant de 25 p. 100 le poids des automobiles et de 5 p. 100 celui des voitures remorquées (p. 517). Si une partie seulement des essieux sont freinés, P' doit être réduit en conséquence.

On voit par cette équation que, pour un ralentissement donné, le temps employé t est d'autant plus grand et par suite les secousses en queue du train, dans lequel la propagation du serrage se fait de l'avant à l'arrière, d'autant moins sensibles que les vitesses V_0 sont plus grandes, ce qui est bien conforme à l'expérience.

Dans le cas où les roues sont bloquées, on doit substituer à la valeur de f celle de f, qui est sensiblement

$$f = 0{,}08 - 0{,}002\,v\,;$$

d'où, en faisant $p = P$,

$$t = \frac{P'}{9{,}81 \times 0{,}002 \times P}\log\text{ nép}\,\frac{0{,}08 - 0{,}002\,v + i}{0{,}08 - 0{,}002\,v_0 + i}.$$

D'après les données de Sperry on écrirait une équation analogue.

[1] *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, septembre 1889.

Freinage rationnel ; données pratiques. — Le principe d'un bon freinage est, comme on vient de le voir, de réaliser sur les roues un frottement aussi élevé que possible, tout en évitant de les bloquer. Mais la pression nécessaire pour produire un effort retardateur donné doit varier proportionnellement au coefficient de frottement ; par exemple, M. Douglas Galton a trouvé qu'aux vitesses de 80 et 32 km. : h. ces pressions sont dans le rapport de 2,5 à 1, comme les pressions qui amènent le calage. Dans ces conditions, l'augmentation du coefficient de frottement des sabots sur les roues lorsque la vitesse décroît présente un inconvénient pratique dont il faut tenir compte, surtout lorsqu'on freine à grande vitesse : c'est que, si l'on serre les freins au début de manière à utiliser toute l'adhérence jusqu'au moment où le glissement aurait une tendance à se produire, il y aura des patinages à la fin de l'arrêt. Pour réaliser l'effet le plus puissant, il faut donc réduire peu à peu le serrage, en même temps que la voiture ralentit ; cela rend désirable l'emploi de freins facilement et constamment modérables.

Les freins à air comprimé, combinés au besoin avec une commande électrique, satisfont assez bien aujourd'hui à ce desideratum. Les freins électro-magnétiques étudiés plus loin donnent une solution meilleure encore, parce que le réglage se produit de lui-même et que le patinage peut être sûrement évité.

D'autre part, un bon frein doit agir sur tous les essieux moteurs et provoquer un serrage très rapide, pour amener promptement la période du ralentissement. Cette condition, particulièrement nécessaire pour les longs trains de chemins de fer, sera facilement remplie pour les trains légers des chemins de fer électriques par tous les bons types de freins existants.

Enfin, une condition particulièrement importante pour les services à grande vitesse, c'est que le freinage puisse atteindre une puissance très élevée sans causer de secousses désagréables aux voyageurs ; cette question est aussi importante pour les métropolitains que celle de l'accélération, au point de vue de la réalisation d'une grande vitesse commerciale, car plus l'arrêt est rapide, plus on peut maintenir longtemps la vitesse maxima. Pour atteindre de hautes retardations sans secousses, il faut serrer les freins progressivement au début et les desserrer progressivement à la fin, de façon

CONDITIONS PRATIQUES DU FREINAGE SUR DIVERSES LIGNES AMÉRICAINES

NOM DE LA LIGNE	OBSERVATIONS	NOMBRE DE VOITURES	POIDS DU TRAIN en tonnes.	DÉCLIVITÉ	TYPE DE FREINS	VITESSE EN KM. A L'HEURE avant l'application des freins.	PARCOURS D'ARRÊT en mètres.	TEMPS D'ARRÊT en secondes.	RETARDATION MOYENNE par seconde en kilomètres à l'heure.	EFFORT DE FREINAGE équivalent en kilogrammes par tonne.
Metropolitan Elevated	Arrêt normal . .	2	44	0	A air comprimé direct.	30,5	55	13	2,35	60
Lake Street Elevated.	— . .	2	44	0	A air comprimé automatique.	40,2	89	16	2,51	64
Alley Elevated.	— . .	3	72	0	—	49,9	159	23	2,17	56
Illinois Central	— . .	4	116	0	—	64,4	331	37	1,74	44
Manhattan Elevated	— . .	4	95	0	A vide.	35,4	118	24	1,48	38
Cleveland, Painesville and Eastern	— . .	1	20	0	Électrique.	64,4	178	20	3,22	82
Cleveland, Painesville and Eastern.	Arrêt d'urgence.	1	20	0	—	48,3	67	10	4,83	124
Lorain and Cleveland	— .	1	23	0	—	72,4	140	14	5,16	133
Schenectady Street Ry.	Arrêt normal . .	1	9	0	—	37	41	8	4,63	119

à éviter tout changement brusque de vitesse. Moyennant cette précaution, on peut employer des retardations de 1 m : s : s., correspondant à un effort retardateur de 102 kg. par tonne. En pratique cependant ce chiffre est rarement atteint ; le tableau de la page 735, qui résume un certain nombre de données d'expérience américaines, montre que, sur les métropolitains, on ne dépasse guère 50 à 60 kg : t.

En cas de danger, on peut pousser l'effort plus loin, jusqu'à la limite d'adhérence, soit 150 à 250 kg : t. sur les chemins de fer à rails propres (voir p. 485).

En ce qui concerne les tramways, un effort retardateur minimum est imposé en France par la règle dite « des trois vingts », formulée par l'article 21 du décret du 6 août 1881 sur l'établissement et l'exploitation des voies ferrées sur le sol des voies publiques, qui est ainsi conçu : « Les machines seront pourvues de freins assez puissants pour que, lancées sur une pente de 0,020 avec une vitesse de 20 km : h., elles puissent être arrêtées, sans le secours des freins des voitures remorquées, sur un espace de 20 m. au plus ». En appliquant la formule du freinage (108) à ces conditions, avec $P' = 1{,}25$ P, on trouve qu'elles exigent un effort retardateur de 120 kg. environ par tonne de train, peu différent de celui que permet de réaliser l'adhérence, soit 150 kg. avec du sable (p. 486).

Ces conditions ne sont d'ailleurs pas suffisantes pour assurer la sécurité sur les réseaux à pentes un peu fortes, comme il s'en rencontre sur les tramways. La question mérite donc d'être examinée de plus près, en vue d'imposer dans certains cas des mesures plus rigoureuses, ainsi qu'on va le voir.

Limites de sécurité qu'on peut obtenir sur les tramways avec des freins. — M. Denizet, ingénieur des ponts et chaussées, a dressé à l'aide de l'équation approximative (108), où il néglige la différence entre P' et P, une table[1] que nous reproduisons ci-contre (p. 737).

Cette table indique les valeurs de X pour des pentes variant de 0 à 0,130 et des vitesses comprises entre 6 et 20 km. à l'heure,

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, décembre 1895, p. 645.

ARRÊT D'UNE VOITURE GLISSANT SUR LES RAILS

T = durée de l'arrêt en secondes. — X = espace parcouru en mètres)

COEFFICIENT de FROTTEMENT	PENTE	Vitesse de 6 kilomètres à l'heure ($V_o = 1,67$)		Vitesse de 8 kilomètres à l'heure ($V_o = 2,22$)		Vitesse de 10 kilomètres à l'heure ($V_o = 2,777$)		Vitesse de 12 kilomètres à l'heure $V_o = 3,33$)		Vitesse de 15 kilomètres à l'heure ($V_o = 4,17$)		Vitesse de 20 kilomètres à l'heure ($V_o = 5,55$)	
		T	X	T	X	T	X	T	X	T	X	T	X
		secondes	mètres	secondes	mètres	secondes	mètres	secondes	mètres	secondes	mètres	secondes	mètres
$f = 0,14$	$i = 0,04$	1,703	1,422	2,263	2,512	2,832	3,931	3,396	5,654	4,253	8,867	5,661	15,709
	0,06	2,131	1,783	2,833	3,145	3,544	4,919	4,649	7,741	5,222	11,096	7,082	19,652
	0,08	2,843	2,374	3,780	4,196	4,730	6,565	5,672	9,443	7,101	14,805	9,453	26,232
	0,10	4,281	3,575	5,686	6,314	7,119	9,881	8,538	14,215	10,691	22,290	14,229	39,485
	0,12	8,581	7,162	11,408	12,663	14,270	19,807	17,112	28,492	21,428	44,677	28,520	79,143
	0,13	17,183	14,348	22,846	25,359	28,571	39,657	34,265	57,051	42,908	89,463	57,112	158,485
$f = 0,12$	$i = 0,04$	2,128	1,777	2,829	3,140	3,540	4,914	4,245	7,067	5,316	11,083	7,075	19,633
	0,06	2,840	2,371	3,775	4,190	4,723	6,556	5,663	9,428	7,093	14,788	9,439	26,193
	0,08	4,272	8,567	5,681	6,306	7,107	9,865	8,522	14,189	10,670	22,246	14,204	39,416
	0,10	8,561	7,148	11,377	12,628	14,239	19,764	17,076	28,431	21,382	44,581	28,459	78,973
	0,11	17,142	14,314	22,785	25,291	28,510	39,572	34,183	56,914	42,806	89,250	56,969	158,088
$f = 0,10$	$i = 0,04$	2,837	2,369	3,770	4,185	4,718	6,548	5,658	9,420	7,084	14,770	9,429	26,165
	0,06	4,267	3,563	5,673	6,297	7,496	10,404	8,510	14,169	10,658	22,221	14,183	39,397
	0,08	8,545	7,135	11,362	12,612	14,214	19,729	17,045	28,379	21,341	44,495	28,408	78,832
	0,09	17,112	14,288	22,707	25,205	28,440	39,474	34,112	56,796	42,724	89,079	56,857	157,778
$f = 0,08$	$i = 0,04$	4,262	3,559	5,665	6,288	7,089	9,839	8,502	14,154	10,645	22,194	14,468	39,316
	0,06	8,535	7,127	11,346	12,594	14,193	19,700	17,029	28,338	21,316	44,443	28,367	78,718
	0,07	17,081	14,263	22,704	25,201	28,397	39,415	34,061	56,711	42,653	88,931	56,765	157,522

en faisant diverses hypothèses sur le coefficient de frottement f ($f = 0,14$; $0,12$; $0,10$; $0,08$). Nous avons traduit les résultats relatifs à la première de ces hypothèses ($f = 0,14$) sous forme de courbes dans la figure 913.

La seule difficulté est de savoir sur laquelle de ces valeurs on peut compter ; sur des voies boueuses avec rails à ornières, le frot-

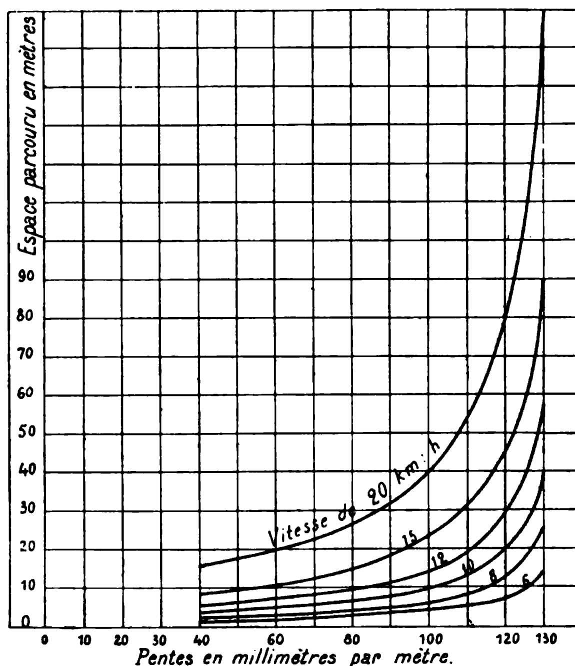


Fig. 913. — Parcours d'arrêt d'une automobile à diverses vitesses sur des pentes de 40 à 130 mm : m. dans l'hypothèse d'un coefficient de frottement de 0,14.

tement est très faible et f peut descendre à 0,06 ; au contraire, sur des rails propres ou sablés, le coefficient d'adhérence peut atteindre 0,20 et même davantage.

Si l'on a soin, comme cela est désirable, de munir les voitures de boîtes à sable et d'habituer les mécaniciens à s'en servir pour les arrêts instantanés, on peut compter sur un coefficient de 0,14 et, par suite, sur des parcours d'arrêt inférieurs à 10 m. tant que la vitesse ne dépasse pas 15 km : h., ni la pente 0,04. Il semble même que l'on soit dans ce cas au-dessous de la réalité, car, d'après les expériences de M. Sperry, qui fait autorité en matière de freinage

de l'autre côté de l'Atlantique, on peut, dans ces conditions et même avec les vitesses plus grandes usitées en Amérique, arrêter les voitures sur un parcours de 7 m. et, si les roues sont couplées, de 5 m.

D'après cet auteur et de l'avis général des ingénieurs américains, ce n'est pas à un défaut d'adhérence, mais soit à l'insuffisance de puissance ou à la rupture des freins, soit à une fausse manœuvre du mécanicien qu'il faut attribuer les accidents qui se produisent de temps à autre sur les lignes de tramways.

A San Francisco, du reste, une pente de 0,140 ayant 200 m. de longueur, dans Harrison street, est franchie à des vitesses de 8 à 10 km : h. depuis plusieurs années sans un seul accident. On descend dans les mêmes conditions des pentes de 0,145 dans la même ville.

A Oakland, des automobiles à bogies franchissent également des rampes de 0,145 ; les deux moteurs sont montés sur le bogie d'arrière, qui a été rapproché du centre de la voiture de façon à faire porter la plus grande partie du poids sur les roues motrices; les bogies rendent la descente beaucoup plus sûre, parce que le nombre de roues freinées par les sabots est double. Les quelques accidents qui se sont produits sur ces pentes doivent être attribués uniquement, d'après les ingénieurs, à ce que le mécanicien a perdu la tête.

En Europe, on n'a eu jusqu'ici à déplorer qu'un accident grave, qui s'est produit sur le tramway de Florence-Fiesole, en 1890; il n'a pas eu pour cause une insuffisance des freins, mais bien l'affolement du mécanicien, encore peu expérimenté, qui n'a pas eu la présence d'esprit de les faire manœuvrer.

Les voitures du tramway de Marseille-Saint-Louis, qui sont munies d'un double frein, descendent sans accident à la vitesse de 8 km. à l'heure une pente de 0,06. Au funiculaire de Belleville, sur la déclivité maxima de 0,075, la voiture, qui marche avec le câble à l'allure de 10,8 km. à l'heure, peut être arrêtée après un parcours de 7 à 8 m. au moyen soit du frein ordinaire, soit du frein à patins, pourvu que ceux-ci aient été disposés de façon à être serrés à fond dès le lâchage du câble. A Lausanne et au Havre, on a jugé prudent de munir les voitures, en outre du frein ordinaire, d'un frein à griffes qui sera décrit plus loin.

D'après M. Denizet, avec un double jeu de freins à manœuvre

très rapide et d'une solidité éprouvée et des rails propres et secs, on pourrait descendre pratiquement avec sécurité les pentes suivantes :

Pente de 0,06 sur 500-600 m. de longueur, à la vitesse de	8 km : h.
— 0,08 sur 200-300 m.	—	—	6	—
— 0,10 sur 100-150 m.	—	—	4	—

Au-dessus de 0,10 ou au delà des longueurs maxima qui viennent d'être indiquées, on devrait renoncer à l'adhérence pour recourir à la crémaillère ou au câble ; on pourrait cependant conserver à la rigueur la marche par adhérence sur des pentes plus longues, à condition de redoubler de prudence et de marquer l'arrêt complet après chaque section de 500, 200 ou 100 m. au plus, suivant que les pentes seraient de 0,06, 0,08 ou 0,10.

Ces règles nous paraissent assurer une parfaite sécurité. Elles pècheraient même plutôt, d'après les exemples précédents, par excès de prudence, car il n'y a aucune nécessité de marquer des arrêts pourvu qu'on ne laisse pas accélérer la vitesse. L'arrêt n'est rationnel qu'au moment d'attaquer la pente, parce qu'il permet de supprimer la vitesse initiale due à la force vive et de régler tout de suite les freins au serrage convenable. C'est ainsi qu'à San Francisco les grandes pentes mentionnées ci-dessus ne sont abordées qu'après arrêt préalable. Moyennant cette condition, pour les pentes exceptionnelles, nous supprimerions volontiers toute limitation de longueur et nous admettrions 6 km : h. comme vitesse limite sur les pentes supérieures à 0,08.

Mais il ne faut pas oublier que ces règles supposent implicitement des freins assez puissants pour obtenir l'effet maximum du freinage auquel correspond la formule et *à action assez rapide* pour réaliser immédiatement le serrage maximum. Cette dernière condition n'est pas, croyons-nous, suffisamment remplie avec les freins à sabots. A Paris, l'ordonnance générale de police du 31 août 1897 rend d'ailleurs obligatoire l'emploi de freins continus[1].

[1] Voici le libellé de l'article 306 de cette ordonnance (annexe 27) :

« *Freins*. — Les machines, remorqueuses ou automobiles, seront pourvues de freins assez puissants pour que, lancées sur une pente de 0,020 m. par mètre, avec une vitesse de 20 km. à l'heure, elles puissent être arrêtées, sans le secours des freins des voitures remorquées, sur un espace de 20 m. au plus.

« Les trains seront munis de freins agissant sur tous les essieux et pouvant être

Le meilleur moyen d'empêcher l'accélération sur les pentes et d'assurer par suite une sécurité complète sans ralentissement exagéré, c'est l'emploi du frein électrique et, lorsque cela est possible, de la *récupération*, dont nous avons exposé plus haut le mode d'application. Celle-ci maintient la vitesse automatiquement constante sans permettre le patinage et présente à ce point de vue encore de très sérieux avantages.

Lorsque les pentes sont très fortes, il faut en tous cas recourir à des dispositifs spéciaux, dont nous allons dire un mot.

Freins spéciaux pour fortes pentes. — Les freins ont naturellement une importance capitale sur les lignes à fortes pentes; en dehors des moyens de freinage ordinaires déjà décrits et notamment du frein à patins, on emploie sur ces lignes des freins de sûreté agissant indépendamment du frottement sur les rails de roulement.

Le dispositif *Fell*, qui a été appliqué avec succès au passage du Mont-Cenis avant l'achèvement du tunnel pour obtenir une adhérence indépendante du poids de la locomotive, donne également de bons résultats comme frein ; il est employé notamment sur les lignes du Mont-Snaefell et du Fayet à Chamonix. Le système consiste, comme on le sait, dans l'addition à la voie d'un rail central que viennent embrasser de part et d'autre des roues horizontales fixées au véhicule; lorsque l'appareil ne sert qu'au freinage, ces roues peuvent être remplacées par de simples mâchoires. Au Mont-Snaefell, le rail auxiliaire est en acier, à double champignon, et pèse 37,5 kg. par mètre courant; il est boulonné sur des coussinets en acier forgé fixés par des crampons sur les traverses de la voie ; les voitures sont munies à chaque extrémité de deux mâchoires en acier, qui peuvent être serrées contre le rail central au moyen d'un jeu de leviers actionnés par une vis ; au centre du châssis se trouvent en outre deux paires de galets à gorge horizontaux embrassant le rail et servant à empêcher le soulèvement de la voiture.

Nous mentionnerons également un frein spécial employé à Lausanne sur une rampe de 11,3 p. 100 et dont l'ingénieuse idée est due à M. Palaz. Il consiste

manœuvrés de deux manières indépendantes l'une de l'autre, savoir : 1° par le mécanicien ou son aide, au moyen d'un appareil continu; 2° pour chaque véhicule, au moyen de commandes placées à la portée des agents de ces voitures.

« Le frein continu devra être exempt de tout danger de raté, quelle que soit la température.

« Les freins seront toujours maintenus en parfait état. Ils seront disposés de manière à pouvoir être actionnés instantanément à un moment quelconque.

« Les machines, remorqueuses ou automobiles, seront pourvues de moyens nécessaires pour maintenir le frottement sur les rails, quel que soit l'état de ces derniers, à une valeur suffisamment élevée pour que les conditions d'arrêt exigées par le présent article soient remplies en toutes circonstances, même en cas de dérive. »

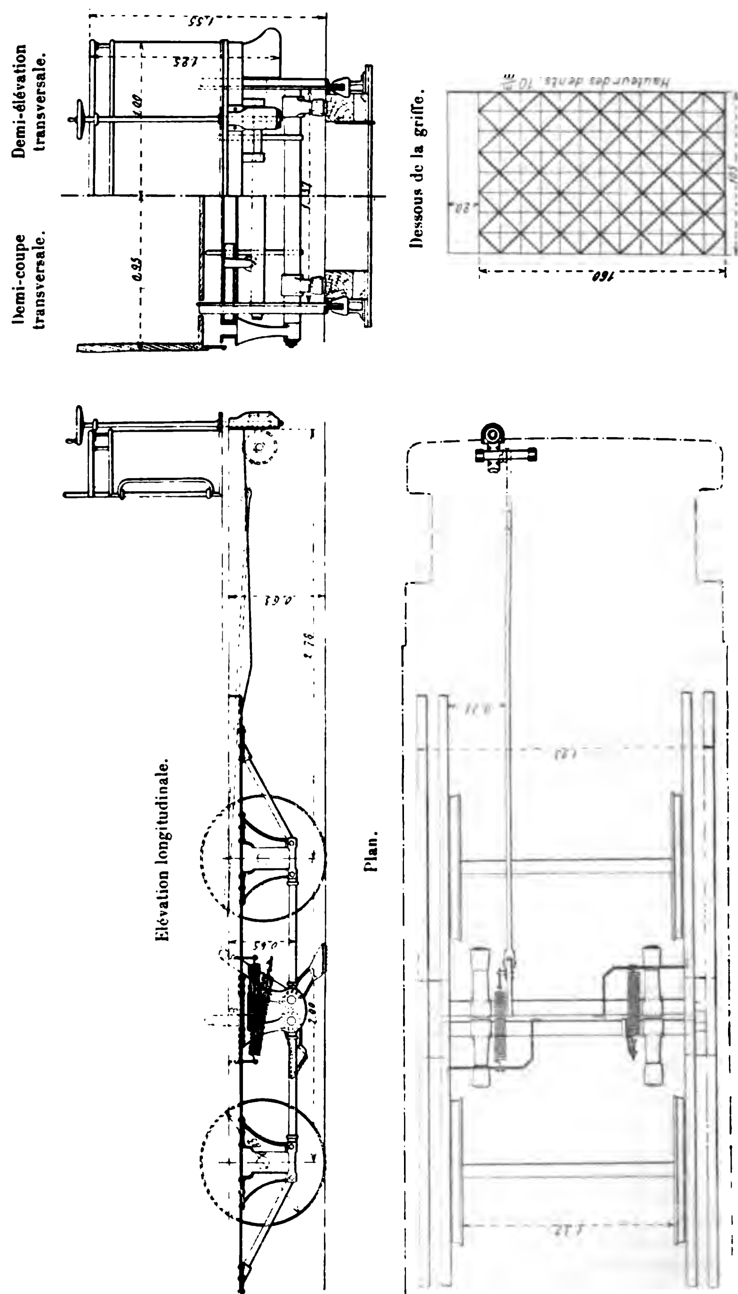


Fig. 911. — Frein à griffes employé sur les tramways du Havre.

en des sortes de griffes placées de chaque côté de la voiture et qui sont bandées par des ressorts ; il suffit que le mécanicien appuie le pied sur une gâchette

qui tient ces griffes levées en temps normal pour qu'elles se déclenchent et viennent mordre énergiquement sur des longrines en bois placées extérieurement à la voie contre les rails.

Sur la ligne de la côte Sainte-Marie, au Havre, qui, sur une longueur de 750 m., comporte des rampes variant entre 76 et 115 mm : m., les voitures ont été munies d'un frein à griffes du même genre ; les seules modifications consistent dans la suppression des ressorts de commande des griffes qui agissent trop brutalement et leur remplacement par des vis donnant une action plus lente en même temps qu'une pénétration plus vive; en outre, on a placé des griffes dans les deux sens de la marche de la voiture (fig. 914).

Sur les lignes à crémaillère, le système de frein le plus employé est un frein de friction consistant en tambours cannelés, montés généralement sur l'arbre de la roue de crémaillère de part et d'autre de cette roue et contre lesquels on peut venir appliquer des sabots appropriés à l'aide de vis placées sur les plates-formes.

A Barmeu et sur quelques autres lignes, on a cru devoir munir en outre les automobiles d'un frein automatique actionné par un régulateur à force centrifuge, qui entre en fonction dès que la vitesse du véhicule dépasse une valeur déterminée ; à ce moment un ressort agit sur le frein à crémaillère. Un frein du même genre fonctionne au Mont-Pilate [1].

Calcul de la timonerie des freins à main. — Les freins à main étant encore très répandus sur les tramways, au moins à titre de freins de secours, nous donnerons quelques indications sur leur calcul.

Pour que le freinage produise l'effet maximum, il faut que l'effort F puisse atteindre réellement la valeur Pa, produit de l'adhérence par le poids total, comme nous l'avons supposé pour établir les formules (108) et (109) ; cela exige qu'on puisse réaliser une certaine pression sur le frotteur. Par exemple, dans le cas de freins à sabots frottant avec un coefficient f' contre un tambour de diamètre d, la pression totale p par essieu devra satisfaire à la relation

$$2 \frac{d}{D} pf' = Pa. \tag{110}$$

Il faut connaître comme point de départ l'adhérence a, le coefficient de frottement f' et l'effort musculaire que peut produire le mécanicien. Nous nous servirons dans ce calcul des résultats d'expériences exécutées en Amérique par M. Sperry [2].

Cet ingénieur a mesuré au dynamomètre l'effort qu'un mécani-

[1] On trouvera la description de ce frein dans la *Revue technique de l'Exposition Universelle de* 1889, n° 16, p. 162.

[2] *Loc. cit.*

cien peut exercer pratiquement sur une manivelle de frein à main ; ses mesures ont porté sur 13 mécaniciens bien habitués au service et ayant un poids moyen de 78 kg. Les chiffres obtenus ont donné les moyennes suivantes :

Effort moyen prolongé obtenu avec un seul bras. . . .	60 kg.
— — — avec les deux bras . . .	100 —
Effort maximum temporaire obtenu avec les deux bras.	150 —

On ne peut compter sur les chiffres les plus élevés en service courant, parce que les mécaniciens sont d'inégale vigueur et se fatiguent rapidement[1]. On est ainsi conduit à estimer pratiquement à 80 kg. au plus et 50 kg. *en moyenne* l'effort réalisable. C'est ce dernier chiffre que nous adopterons.

D'autre part, comme nous l'avons dit plus haut, M. Sperry a mesuré les valeurs du coefficient f' de frottement de sabots en fonte contre la jante des roues, les surfaces étant dans leurs conditions normales après un service prolongé, et il résulte de ses expériences et de celles de M. Douglas Galton citées plus haut qu'on peut compter sur un coefficient moyen pratique de 0,12.

Ceci posé, l'égalité précédente (110), si l'on y fait

$$f' = 0{,}12, \quad a = 0{,}15 \quad \text{et } d = D,$$

exigerait pour chaque essieu d'une voiture de 10 t. une pression aux sabots

$$p = \frac{10\,000}{2}\,\frac{0{,}15}{0{,}12} = 6\,250 \text{ kg.}$$

Mais, en général, on ne compte pas sur une adhérence aussi élevée et l'on se contente de la supposer égale au coefficient de frottement des sabots. La pression totale des sabots sur toutes les roues du véhicule doit alors être égale au poids même de la voiture. On y gagne de ne pas faire patiner trop facilement les roues, mais on y perd en rapidité d'arrêt lorsqu'on admet l'usage des boîtes à sable pendant le freinage.

[1] En effet, pour peu que le trafic soit intense, le conducteur est amené à serrer les freins 300 et 400 fois par jour. Sur certaines lignes américaines, on a calculé que le nombre de serrages des freins atteignait 1 300 par voiture, pour un service journalier de 18 heures.

On voit que la timonerie doit produire ordinairement des multiplications de 100 à 120 pour des automobiles de 10 t. en charge et plus encore pour les lourdes voitures à impériale. Cette multiplication est réalisée à l'aide de leviers successifs dont nous avons indiqué plus haut quelques-unes des dispositions et dont le calcul est toujours aisé à faire.

Prenons d'abord comme exemple une des voitures de la ligne de Paris-Romainville (fig. 915 et 915 *bis*). Le poids de la voiture est de 12 t. Chaque roue supporte une charge de 3 000 kg.; c'est l'effort minimum qu'on doit développer sur chaque sabot. Il est exercé par une série de trois leviers successifs, dont les bras sont respectivement dans les rapports amplificateurs

$$\frac{294}{70}, \frac{200}{100} \text{ et } \frac{210}{125},$$

de sorte que les forces à appliquer à chacun des leviers et d'après lesquelles doivent être calculées les sections des tiges sont respectivement :

$$\frac{70}{294} 3\,000 = 716 \text{ kg.},$$

$$\frac{100}{200} 716 = 358 \text{ kg.},$$

$$\frac{125}{210} 358 = 213 \text{ kg.}$$

Ce dernier effort est exercé par le moyen d'une vis à filet carré dont le pas est de 25 mm. et qu'on manœuvre par une manivelle de 200 mm. de rayon. La traction de la manivelle doit donc être

$$213 \frac{25}{200} = 4{,}2 \text{ kg.},$$

ce qui ne fait en tout, pour les quatre sabots, que 16,8 kg., effort très faible pour un mécanicien, d'après ce que nous venons de dire. Mais il est bon de le majorer de 50 p. 100 pour tenir compte des frottements [1], toujours considérables dans les vis.

Le frein peut être actionné en même temps par le conducteur placé sur la plate-forme d'arrière, ce qui augmente la sécurité.

Comme second exemple, nous prendrons une timonerie moins puissante placée sur les voitures de Roubaix-Tourcoing (voir fig. 305, t. I, p. 335); la

[1] C'est à tort qu'on négligerait ces frottements sous prétexte qu'il s'agit d'une équation de statique, car en réalité il faut pouvoir mouvoir le frein pour le serrer et c'est là qu'intervient le travail de frottement ; il est d'autant plus nécessaire d'en tenir compte que la poussière et l'insuffisance de graissage peuvent lui donner une valeur élevée.

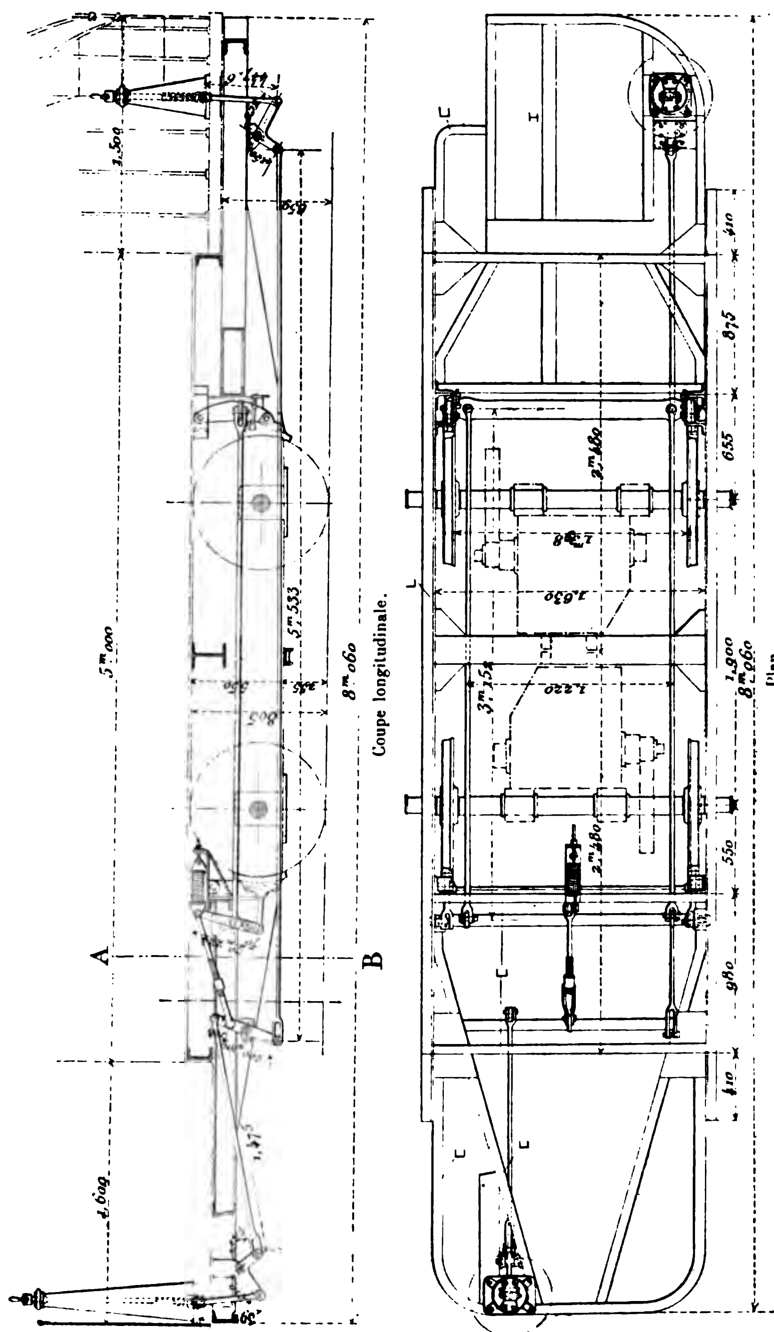
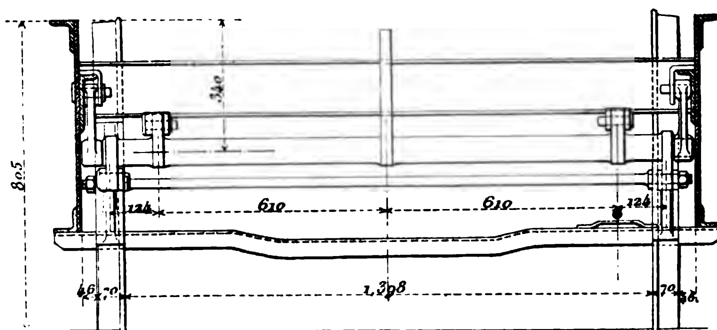


Fig. 915. — Ensemble du frein des voitures de Romainville.

figure 916 donne le schéma et les dimensions de cette timonerie, qui est absolument symétrique.



Coupe transversale suivant AB.

Fig. 915 *bis*. — Ensemble du frein des voitures de Romainville.

Le frein est encore à quatre sabots et manœuvrable des deux plates-formes. Il est commandé par une chaine qui s'enroule en hélice sur un arbre de 35 mm.

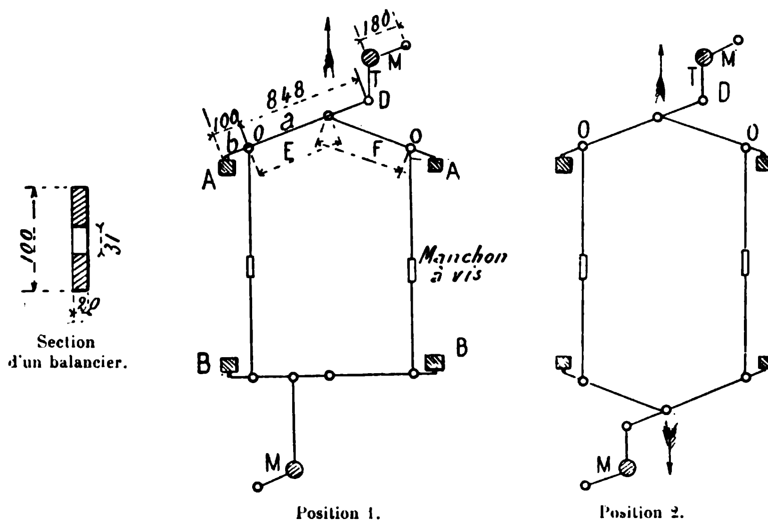


Fig. 916. — Schéma de la timonerie des voitures de Roubaix-Tourcoing.

de rayon mû par une manivelle de 180 mm. La tension de la chaine produite par un effort de 50 kg. est par suite

$$T = 50 \times \frac{180}{35} = 255 \text{ kg.}$$

Cette chaine tire l'extrémité D du levier D*b* et fait ainsi pivoter les deux leviers D*b* et *a*A autour des articulations O, en même temps que ceux-ci tendent

les tringles de commande des sabots postérieurs. La pression qui s'exerce sur l'ensemble des sabots antérieurs a pour valeur l'effort de la chaîne multiplié par l'amplification des leviers

$$T \times \frac{a}{b} = 255 \frac{848}{100} = 2\,160 \text{ kg.}$$

Si la chaîne de la seconde manivelle a du mou, les deux leviers des sabots BB restent alignés (position 1) ; si au contraire elle est serrée dans la position du repos, les leviers postérieurs pivotent autour de leurs articulations comme les leviers antérieurs (position 2). Dans le premier cas, le seul point d'appui des leviers étant les sabots A, la pression exercée sur la barre postérieure et par suite sur les sabots sera

$$T \times \frac{a+b}{b} = 255 \frac{948}{100} = 2\,417 \text{ kg.}$$

Dans le second cas, l'effort sur les sabots postérieurs est, par raison de symétrie, égal à celui sur les sabots d'avant, c'est-à-dire 2 160 kg. La pression totale sur les quatre sabots peut donc être de 4 577 ou 4 320 kg. On doit la supposer réduite ici de 20 à 25 p. 100 par les frottements ; dans tous les cas, elle est un peu trop faible pour utiliser complètement l'adhérence.

Les freins à coins et les freins Lemoine se calculent d'une façon analogue[1], en partant des formules données plus haut. Les cordes font 1 1/2 ou 2 tours ; elles peuvent supporter des tensions de 1 000 kg. ; leur diamètre d'enroulement est de 0,14. Quant aux freins à patins, on détermine leur timonerie de façon à y appliquer un effort vertical voisin du poids de la voiture, mais un peu inférieur, de façon à éviter de la faire dérailler par soulèvement.

Il est essentiel, bien entendu, que les sections des divers organes des freins soient calculées de façon à pouvoir supporter avec *un excellent coefficient de sécurité* les efforts auxquels ils sont soumis. Par exemple, pour la dernière timonerie considérée, les dimensions ont été déterminées de la façon suivante :

Le piton de la chaîne de commande a 12 mm. de diamètre, soit une section de 113 mm^2; il travaille donc à raison de

$$\frac{225}{115} = 2 \text{ kg. par mm}^2.$$

[1] Il se présente dans ce calcul une petite complication lorsque l'une des roues est folle sur l'essieu, comme cela a lieu sur les tramways de la Compagnie des Omnibus, pour faciliter le passage dans les courbes. Dans ce cas, une seule des roues bénéficie du frottement de la corde ; en outre, les cordes travaillent inégalement. — Cf. Note de M. Mauclère, *Bulletin de la Société des Ingénieurs Civils*, novembre 1888.

La chaine est composée d'anneaux en fer rond de 8 mm. de diamètre, soit 50 mm² de section; le fer travaille donc à l'effort tranchant à raison de

$$\frac{255}{50} = 5 \text{ kg. par mm}^2.$$

Les deux balanciers E et F supportent chacun $\frac{255}{2} = 127{,}5$ kg. à leur extrémité et sont soumis par suite à un moment fléchissant maximum (au point O) de

$$\frac{255}{2} \times 848 = 107\,695 \text{ kg. — mm.}$$

Les dimensions de la section du levier étant celles indiquées par la coupe de la figure 916, le moment résistant est, d'après une formule connue,

$$\frac{20}{6}\,\frac{100^3 - 31^3}{100}\,R = 32\,016 \text{ mm}^3 \times R;$$

le travail du fer à la flexion est donc

$$R = \frac{107\,695}{32\,016} = 3{,}3 \text{ kg. par mm}^2.$$

Enfin, les tringles ont au fond du filet 20 mm. de diamètre, soit 314 mm² de section; la tension maxima étant de 1 210 kg., le travail du fer ne dépasse pas

$$\frac{1\,210}{314} = 4 \text{ kg. environ par mm}^2.$$

Inconvénients des freins commandés à la main. — Les freins à main ont plusieurs inconvénients sérieux. Ils imposent au mécanicien une fatigue excessive, par la répétition fréquente de l'effort musculaire qu'ils exigent. Ils divisent d'une manière gênante son attention, puisqu'il doit se préoccuper surtout du régulateur et qu'en cas d'arrêt il doit toujours amener celui-ci à la position de repos avant de serrer les freins. Enfin, la manœuvre à la main est ou trop lente ou trop faible.

En effet, la multiplication obtenue par les leviers permet de réduire l'effort seulement à la condition d'accroître en proportion inverse le déplacement : une multiplication de 120 implique corrélativement un déplacement du point d'application de l'effort égal à 120 fois celui du frein ; le serrage peut donc exiger plusieurs tours de manivelle et, par suite, il peut s'écouler plusieurs secondes avant que les freins soient en prise, ce qui en compromet absolu-

ment l'efficacité. On ne peut réduire la durée de cette manœuvre qu'en réduisant le pouvoir multiplicateur et l'effort de freinage.

Une autre cause vient encore réduire l'effet utile des freins : c'est l'inégale répartition de la charge entre les deux essieux. Dans les descentes, l'inclinaison de la voiture en avant (fig. 917) reporte une

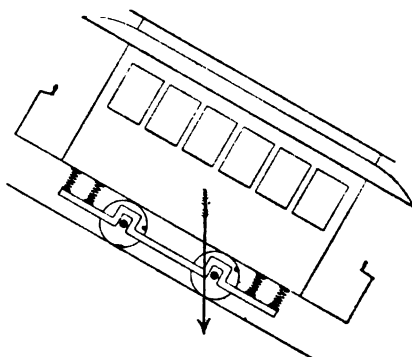


Fig. 917. — Inégale répartition de la charge sur les essieux d'une voiture en pente.

plus grande partie de la charge, supposée concentrée au centre de gravité, sur l'essieu d'avant que sur celui d'arrière; la différence est d'autant plus sensible que l'écartement des essieux est plus faible et l'importance des plates-formes plus grande, à cause de l'inégalité habituelle de répartition des voyageurs[1]. En outre,

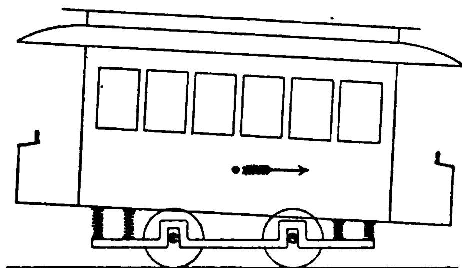


Fig. 918. — Effet de balancement produit sur une voiture par le freinage.

au moment du freinage, la force vive de la voiture tend à la faire pivoter autour de l'essieu avant (fig. 918) et à soulever ainsi les boîtes à graisse de l'essieu arrière, qui peut se trouver complètement déchargé ; les freins continuent à agir également

[1] Heureusement ceux-ci se placent de préférence sur la plate-forme arrière pour éviter le vent, ce qui tend à compenser l'effet fâcheux de la déclivité.

sur les deux essieux, tandis que l'effort d'adhérence des roues d'avant se trouve augmenté aux dépens de celui des roues d'arrière, qui peuvent se mettre à patiner sous l'action des freins.

C'est un des motifs qu'invoquait autrefois M. Sperry pour préconiser la solidarisation des essieux. Lorsque ceux-ci sont couplés par son procédé ou tout autre équivalent, le patinage partiel est impossible et les efforts des freins s'ajoutent, indépendamment de la répartition des poids adhérents.

Mais, avec l'équipement ordinaire, il faut prévoir le cas que nous venons de signaler et donner aux freins une puissance plus grande ; il faut surtout chercher à les rendre aussi instantanés que possible, car 2 secondes perdues à la vitesse de 12 km : h. seulement laissent la voiture avancer d'une longueur.

On se trouve ainsi conduit à adopter pour les automobiles électriques des freins mus par une force autre que la force musculaire.

§ 2. — Freins a commande mécanique ou électrique

Les freins d'entraînement, tels que le frein Lemoine décrit plus haut, sont déjà une sorte de freins à commande mécanique : c'est, en effet, l'essieu lui-même, sur lequel s'enroule la corde, qui produit le serrage des sabots. Ils sont très supérieurs aux freins à main à commande directe au point de vue de la puissance et surtout de l'instantanéité d'action.

Mais nous réserverons ici le nom de freins mécaniques à ceux qui font intervenir un agent autre que la force musculaire du mécanicien.

En fait, deux agents seulement sont employés pour agir sur la timonerie des freins : l'électricité et l'air comprimé ou raréfié ; la pression hydraulique, qui a été essayée à diverses reprises, n'a pas donné de bons résultats, à cause du manque d'élasticité de l'agent de transmission [1].

[1] Voir un exemple de frein hydraulique dans *The Electrical Engineer*, 3 juin 1896.

Freins pneumatiques. — Les systèmes de freins pneumatiques sont nombreux : ils comprennent des freins à vide et des freins à air comprimé ; leur fonctionnement peut être automatique ou non. Comme nous ne pouvons songer, sans sortir de notre cadre, à entrer dans la description de tous les systèmes existants, nous nous bornerons à donner quelques exemples d'application des freins pneumatiques aux tramways et chemins de fer électriques, en faisant ressortir les conditions particulières de cet emploi et en insistant principalement sur les freins spéciaux pour tramways, qui sont moins généralement connus.

La question principale à résoudre dans tous les cas est celle du mode de commande de la pompe à air comprimé ou à vide.

Cette difficulté mise à part, les conditions de fonctionnement des appareils de freinage sur les chemins de fer électriques sont les mêmes que sur les chemins de fer ordinaires, et les mêmes types peuvent être employés ; les meilleurs résultats seront généralement donnés par l'un des systèmes bien connus de freins à la fois automatiques et modérables, tels que les freins Westinghouse, Wenger, Soulerin, etc.

Pour les exploitations de tramways, les freins pneumatiques doivent avant tout être modérables, c'est-à-dire que leur action doit pouvoir être graduée à volonté et suivant les besoins ; ils doivent en outre, bien entendu, être d'un fonctionnement sûr et permettre de ralentir et d'arrêter la voiture un très grand nombre de fois par trajet, tout en laissant constamment à la disposition du mécanicien le moyen de faire des arrêts aussi rapides que possible.

Les freins à action directe, qui sont des appareils essentiellement modérables, offrent donc pour cette application certains avantages ; la lenteur relative de leur action n'a d'ailleurs pas d'inconvénient réel pour des trains composés d'un très petit nombre de véhicules comme le sont toujours ceux des tramways. Ils ont le défaut de ne pas assurer automatiquement l'arrêt des deux tronçons d'un train en cas de rupture d'attelage et de ne pas donner au conducteur d'une voiture remorquée la possibilité d'arrêter le train pour éviter un accident ; mais ce ne sont pas là, en général, des desiderata aussi importants sur les tramways que sur les chemins de fer.

D'autre part, les freins automatiques sont souvent d'une application assez peu commode sur les premiers, en raison de la fréquence des arrêts et des ralentissements, qui peut rendre difficile de recharger des réservoirs entre deux arrêts consécutifs et de garder toujours en réserve la puissance nécessaire pour effectuer un bon arrêt d'urgence.

Nous allons indiquer quelques-unes des solutions adoptées en pratique.

Freins de tramways. — Le « Standard air-brake », l'un des freins pneumatiques les plus répandus sur les tramways des États-Unis, qui est également employé dans un certain nombre d'exploitations européennes, est un frein à air

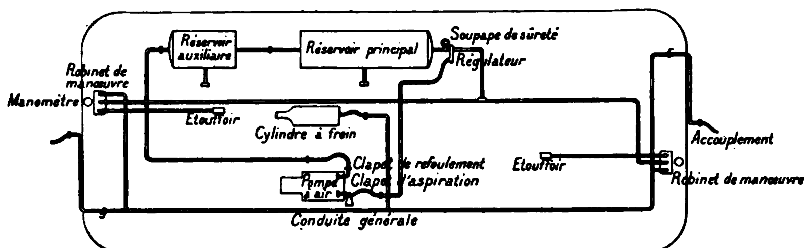


Fig. 919. — Schéma du montage du frein à air comprimé de la Standard Air-Brake Co. sur une voiture des tramways de Leipzig.

comprimé direct. La figure 919 représente schématiquement l'ensemble des appareils tels qu'ils sont montés sur les voitures des tramways électriques de Leipzig. Une pompe comprime de l'air dans des réservoirs, d'où il se rend à travers deux robinets de manœuvre à une conduite générale reliée par un branchement au cylindre à freins. Les robinets de manœuvre permettent d'effectuer, selon le besoin, l'admission de l'air comprimé dans la conduite générale ou son évacuation à l'extérieur ; le mécanicien peut à tout instant augmenter ou réduire la pression de l'air sur le piston et, par suite, la force retardatrice appliquée à la jante des roues, qui lui est proportionnelle.

Pour actionner la pompe de compression, le moyen le plus simple est évidemment de l'atteler directement sur un essieu. Mais ce système n'est applicable que quand on dispose d'une place suffisante entre le moteur et les roues et quand la vitesse de rotation de l'essieu n'est pas trop grande.

Pour les voitures dont la vitesse ne dépasse pas 25 à 30 km : h. la *Standard Air-Brake Co.* construit un type de compresseur à attaque directe qui n'occupe sur l'essieu qu'une longueur de 0,25 m., pouvant même être réduite à la rigueur à 0,15 m., et que représente la figure 920. Cet appareil se compose d'un simple corps de pompe, avec clapets d'aspiration et de refoulement, dont le piston est actionné par un excentrique calé sur l'essieu et tournant à bain d'huile dans une boite étanche ; il est suspendu élastiquement au truck par son autre extrémité et pèse seulement 90 kg. Avec les dimensions de

cylindre usuelles (178 mm. de diamètre et 70 mm. de course), il suffit d'un parcours de 30 m., avec des roues de 0,75 m., pour comprimer dans le réser-

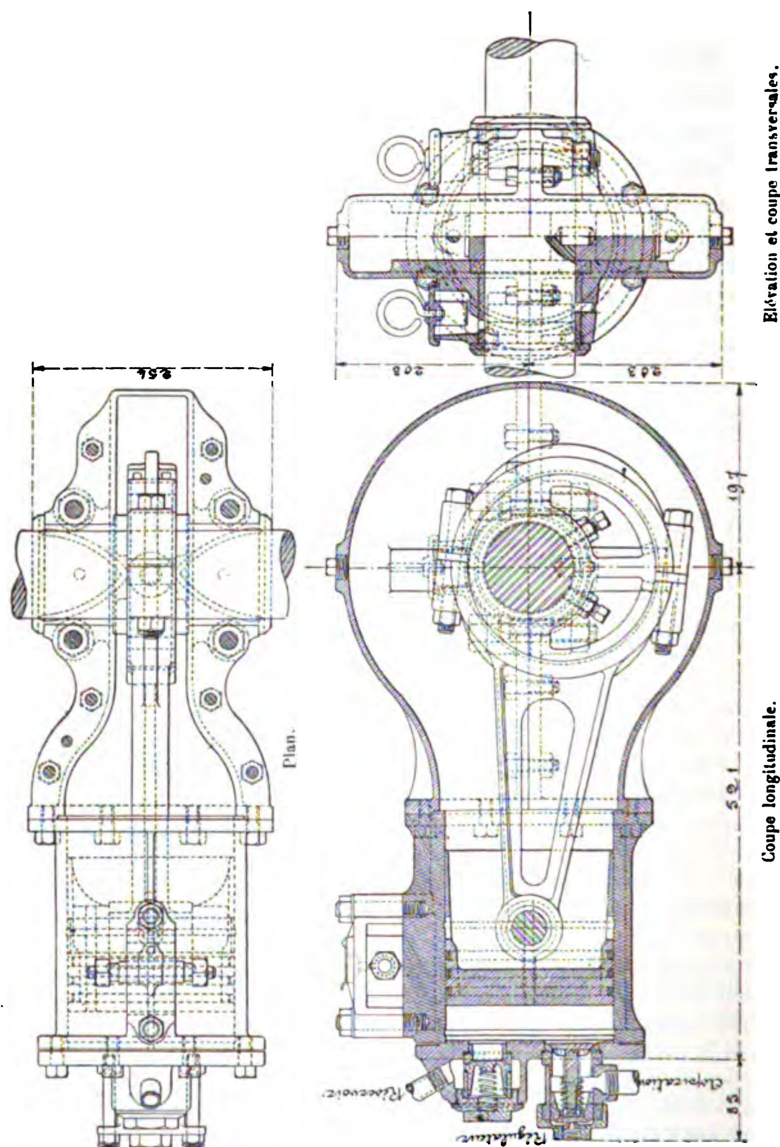


Fig. 920. — Compresseur à commande directe par excentrique de la Standard Air-Brake Co.

voir 9,8 dm³ d'air à 2 kg. de pression, ce qui est en général suffisant pour deux arrêts complets.

Le problème se simplifie lorsqu'on dispose d'un essieu libre. On peut dans ce cas employer l'appareil représenté par la figure 921 et dans lequel la transmission de mouvement de l'essieu à la pompe se fait par engrenages coniques;

tous les organes mobiles sont encore enfermés dans une enveloppe étanche; le poids total de l'appareil s'élève à 180 kg., mais il ne porte qu'en partie sur l'essieu et est muni d'autre part d'une suspension élastique. Ce compresseur peut être employé sur des voitures faisant jusqu'à 80 km : h.; mais, le rapport de réduction des engrenages étant de 1 : 2, le parcours nécessaire pour

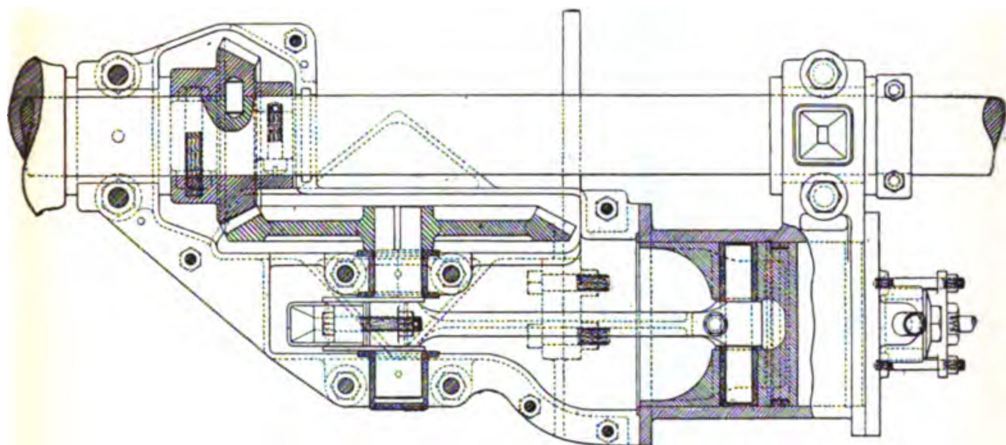


Fig. 921. — Compresseur à commande par engrenages de la Standard Air-Brake Co.

comprimer une même quantité d'air dans le réservoir est double de ce qu'il était avec le type précédent.

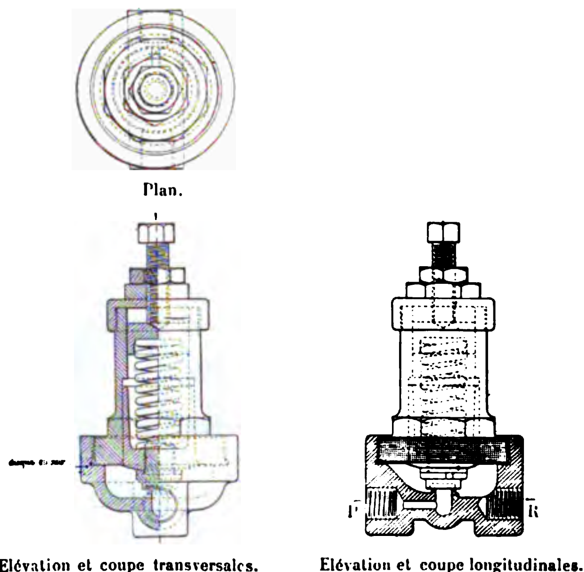
Pour les grandes vitesses et les cas où la place fait complètement défaut sur les essieux, la Standard Air-Brake Co. construit des compresseurs électriques séparés, qui ont l'avantage d'assurer le rechargement des réservoirs indépendamment de la marche du véhicule et ne mettent pas le fonctionnement de la pompe à la merci du faussage possible d'un essieu. Ces appareils, qui sont à commande directe, s'établissent pour des puissances variant de 1 à 10 chev., et les plus petits modèles ont des formes assez ramassées pour trouver facilement place sous l'une des banquettes de la voiture. La figure 922 montre le type de 1 chev., qui mesure seulement 0,56 m. de longueur sur 0,43 m. de hauteur et 0,33 m. de largeur, et pèse environ 100 kg. L'appareil est complètement enfermé; le moteur est construit comme un moteur de traction multipolaire à induit denté et inducteurs cuirassés; la pompe est à deux cylindres à simple effet; les pistons sont reliés directement par bielles à deux poulies d'excentrique calées sur un arbre en prolongement de l'arbre d'induit et tournant dans une boîte étanche partiellement remplie d'huile. A la vitesse



Fig. 922. — Compresseur électrique de la Standard Air-Brake Co.

normale de 600 tours, le moteur consomme 2 à 2,5 amp. sous 500 volts[1].

Il est nécessaire d'arrêter la compression de l'air dans les réservoirs lors-



Elévation et coupe transversales. Elévation et coupe longitudinales.

Fig. 923. — Régulateur de la Standard Air-Brake Co.

qu'elle atteint une valeur déterminée. Le compresseur doit donc être complété par un régulateur automatique. Cet appareil consiste, pour les deux

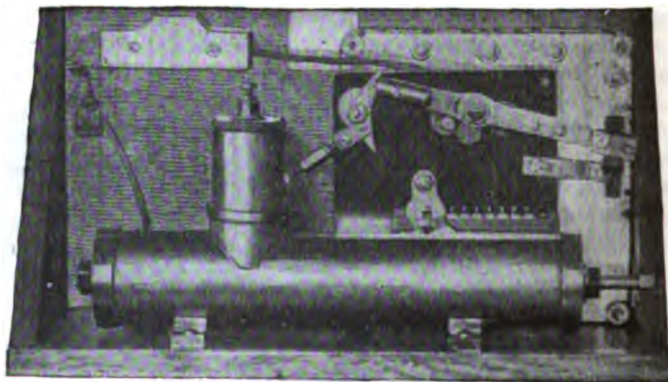
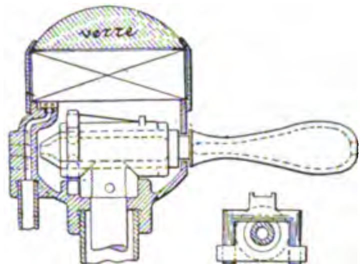


Fig. 924. — Régulateur de courant automatique de la Standard Air-Brake Co.

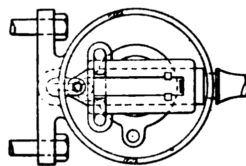
premiers types de compresseur, en une boîte divisée en deux parties par un diaphragme sur lequel repose un piston à ressort (fig. 923); le compartiment

[1] Certaines compagnies américaines utilisent ces compresseurs électriques pour des usages accessoires divers, tels que le nettoyage des planchers et des coussins des voitures, celui des régulateurs, des armatures, des collecteurs, etc.

inférieur communique avec le réservoir par un orifice R, et, dès que la pression de l'air atteint une limite réglée par la tension du ressort, le piston se soulève, découvrant un orifice P par où l'air comprimé se rend derrière le clapet d'aspiration du compresseur, qu'il maintient ouvert d'une façon permanente; le piston du compresseur continue alors à se mouvoir, mais sans produire aucun effet utile, jusqu'à ce que la pression dans le réservoir soit tombée à 10 p. 100 environ au-dessous du maximum fixé; à ce moment le clapet d'aspiration reprend son fonctionnement ordinaire. Dans le compresseur électrique, la régulation se fait à l'aide d'un commutateur automatique (fig. 924), qui arrête l'appareil dès que la pression atteint sa limite supérieure et le remet en marche lorsqu'elle tombe au-dessous d'un certain minimum en intercalant dans le circuit des résistances graduellement décroissantes; en cas d'interruption accidentelle du courant, toutes les résistances sont mises automatiquement en circuit. Le moteur n'a pas besoin ainsi de tourner constamment.



Coupe longitudinale. Coupe transversale.



Plan.

Fig. 925. — Manette de commande des freins et manomètre de la Standard Air-Brake Co.

Comme précaution additionnelle, il y a toujours une soupape de sûreté.

Le nombre des réservoirs varie de 1 à 3 par voiture et est le plus souvent de 2; il comprend alors un réservoir de faible capacité, qui se charge très rapidement et donne le moyen de faire des arrêts après quelques instants de marche du compresseur, et un autre plus grand où l'air ne pénètre qu'une fois le premier rempli et qui sert de réserve. L'air est emmagasiné à une pression généralement comprise entre 2 et 3 kg. Chaque arrêt produit une dépression de 0,15 à 0,20 kg. seulement; les réservoirs contiennent d'ailleurs plusieurs fois la quantité d'air nécessaire pour produire un arrêt complet. Tous les réservoirs sont éprouvés avant d'être livrés à la pression de 10 kg. par centimètre carré.

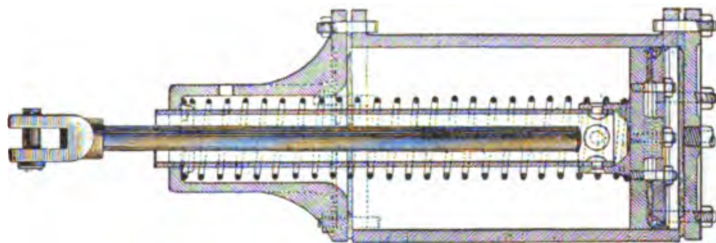


Fig. 926. — Coupe d'un cylindre à freins de la Standard Air-Brake Co.

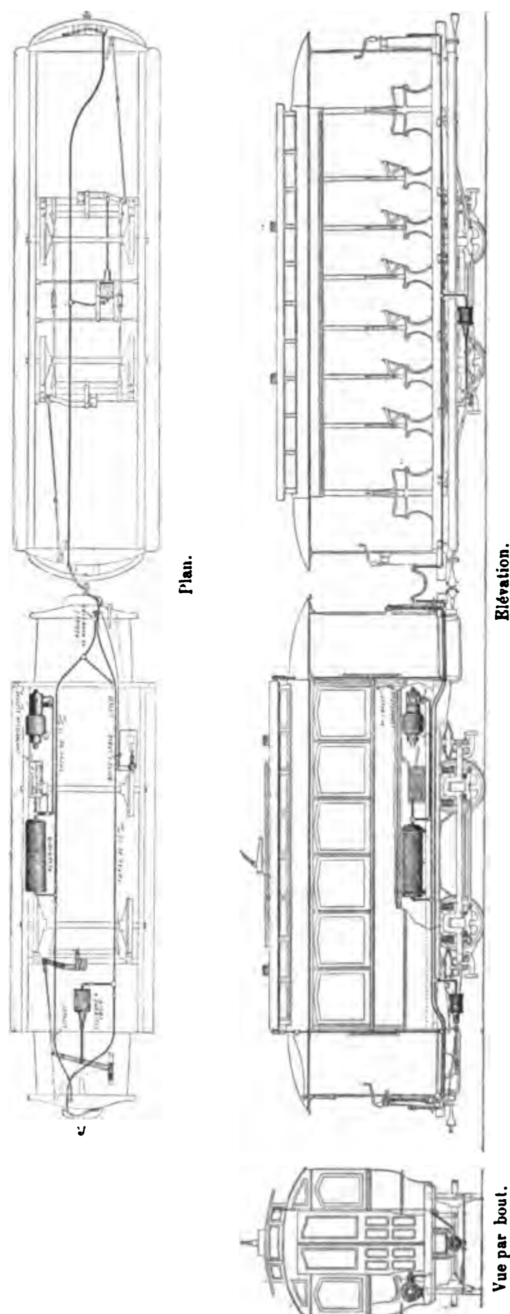


Fig. 927. — Montage du Standard Air-Brake sur un train de deux voitures.

La mise en communication des réservoirs avec le cylindre à freins et l'évacuation de l'air contenu dans ce dernier sont produites par une sorte de robinet à trois voies, manœuvré par le mécanicien à l'aide d'une tige verticale et d'une manette à enclenchement au-dessus de laquelle est monté un manomètre indiquant à tout moment la pression dans les réservoirs (fig. 925). Pour rendre l'appareil moins bruyant, on fait échapper l'air dans un étouffoir.

La figure 926 donne la coupe du cylindre à freins; le piston est garni de cuir embouti; sa tige est attelée directement sur le levier de serrage et disposée de manière à ne pas offrir d'obstacle à la manœuvre du frein à la main en cas d'avarie au moteur mécanique.

Quand l'automobile remorque des voitures d'attelage, celles-ci sont également munies de cylindres à freins, dont la tuyauterie est reliée à celle du premier véhicule par des accouplements convenables. La figure 927 représente, par exemple, la disposition du « Standard Air-Brake » sur un train de deux voitures.

L'équipement complet pour une automobile coûte à New-York :

Avec le compresseur à commande directe. . . . . 875 fr.
— à engrenages. . . . . 1 400 —
Avec le compresseur électrique, 2 à 3 000 fr., suivant la puissance.

On trouve en Amérique plusieurs autres types de freins à air comprimé pour tramways, qui sont plus ou moins analogues à celui que nous venons de décrire et sur lesquels nous croyons, par suite, inutile de nous étendre. Nous signalerons seulement une disposition ingénieuse de compresseur à commande par l'essieu dans laquelle, pour réduire l'usure des pièces mobiles et la

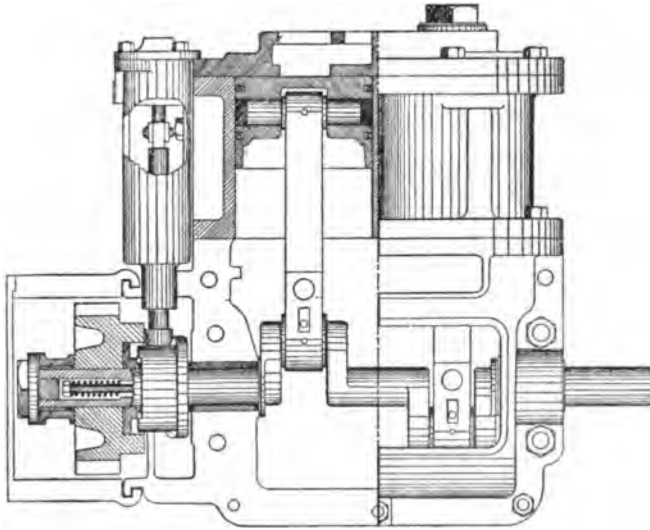


Fig. 928. — Pompe et régulateur du frein Howe.

consommation de puissance, on arrête automatiquement le mouvement des pistons dès que la pression dans les réservoirs atteint une limite déterminée d'avance. Les compresseurs du « National Air-Brake » et du frein *Howe*, par exemple, sont construits de cette façon. La figure 928 représente le second de ces appareils. C'est encore une pompe à deux corps et à simple effet, qui est supportée par des traverses et commandée au moyen d'un double train d'engrenages cylindriques. Le pignon du compresseur est fou sur l'arbre à vilebrequin et peut être embrayé ou débrayé par un manchon à cames; un ressort maintient normalement l'embrayage en prise; le débrayage est produit par une tige qui porte à son extrémité un galet agissant sur les cames et qui est commandée par un régulateur automatique. Celui-ci se compose essentiellement d'un cylindre contenant un piston pressé sur une de ses faces par un ressort et communiquant du côté opposé avec le réservoir; dès que la pression dans ce dernier dépasse une limite réglée par la tension du ressort, le piston s'avance et actionne la tige de débrayage. Le même cylindre porte, du côté du ressort de rappel, un orifice communiquant avec le réservoir par

l'intermédiaire du robinet de manœuvre des freins; le mouvement de la manette qui introduit de l'air comprimé dans les cylindres à freins ouvre en

Élévation.

Plan.

Fig. 929. — Montage du frein Soulerin direct et automatique sur une voiture de tramway.

même temps cet orifice, et l'air du réservoir se trouve alors agir à la fois sur les deux faces du piston régulateur, qui est rappelé par son ressort et laisse l'embrayage se remettre en prise. La dépense d'air occasionnée par chaque application des freins est ainsi immédiatement récupérée par le fonctionnement de la pompe pendant cette application.

Comme exemple de freins à air spéciaux pour tramways construits en Europe, nous citerons le frein *Soulerin* à air comprimé, qui est employé notamment sur le matériel Mékarski et les automobiles Serpollet de la Compagnie générale des Omnibus. C'est un frein mixte, permettant de freiner directement la locomotive ou l'automobile, tout en assurant, en cas de besoin, le freinage automatique de tout le train. La figure 929 en indique le mode de montage sur une automobile; une pompe, non figurée, mais qui peut être actionnée soit par un excentrique calé sur l'un des essieux, soit par un moteur indépendant, comprime l'air dans un réservoir principal, d'où il se rend, en traversant le robinet du mécanicien, dans deux conduites, l'une aboutissant directement au cylindre à freins de l'automobile et servant à envoyer de l'air comprimé directement sur le piston commandant les sabots de celle-ci pour produire un serrage permanent dont l'intensité se règle à volonté, l'autre qui s'étend sur toute la longueur du train et sert au freinage automatique. De cette dernière conduite, l'air est amené sous chaque véhicule par un tuyau d'embranchement à un distributeur (fig. 930) qu'il traverse pour remplir un réservoir auxiliaire ; ce distributeur est réuni d'autre part au cylindre à freins et sa disposition est telle qu'aussitôt que la pression diminue dans la conduite générale, il permet à l'air du réservoir auxiliaire d'affluer dans le cylindre pour y faire jouer le piston.

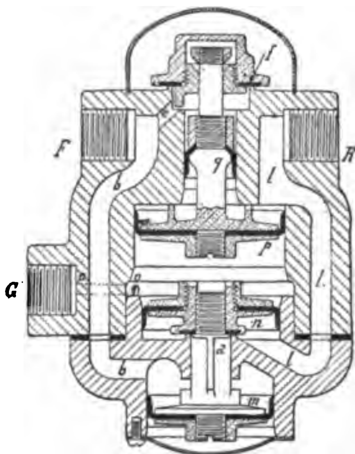


Fig. 930. — Distributeur du frein Soulerin.

G, conduite générale. — F, cylindre à freins. — R, réservoir auxiliaire.

En temps normal, l'air comprimé arrive par l'orifice G dans l'espace compris entre les pistons *n* et *p*, et, passant autour des garnitures de ces pistons, se rend par R dans le réservoir auxiliaire, en faisant appliquer le clapet *a* contre son siège et maintenant le système *pqf* soulevé ; le cylindre à freins communique alors avec l'intérieur par *e*. Lorsqu'une dépression est produite dans la conduite générale, soit par la manœuvre du robinet du mécanicien ou du conducteur, soit par la rupture d'un tuyau d'accouplement, l'air comprimé du réservoir auxiliaire fait appliquer contre les parois les garnitures des pistons *n* et *p*, tandis que *f* s'abaisse et que *a* est soulevé ; le cylindre à freins cesse alors de communiquer avec l'extérieur et reçoit l'air comprimé du réservoir auxiliaire qui passe par le conduit *bb* et l'orifice F, ce qui produit un serrage d'intensité proportionnelle à la dépression dans la conduite.

Pour desserrer les freins, le mécanicien manœuvre son robinet de façon à donner de l'air dans la conduite générale : *a* se ferme et *f* se soulève pour

laisser échapper dans l'atmosphère l'air qui remplissait le cylindre à freins.

Le distributeur placé sur l'automobile est construit d'une façon un peu différente des autres : la modification consiste dans la fermeture du trou d'échappement *e* qui permet l'air du cylindre de s'échapper par le petit clapet supérieur *f*; l'échappement se fait directement par le robinet de manœuvre.

Celui-ci (fig. 931) comporte cinq positions : la première est celle du desserrage, la deuxième celle du repos, après serrage modéré du frein direct, la troisième celle du serrage à fond de ce dernier, la quatrième celle du repos, après serrage modéré du frein automatique, et enfin la cinquième celle du serrage à fond de ce dernier ; la position 2 permet en même temps l'alimentation de la conduite du frein automatique.

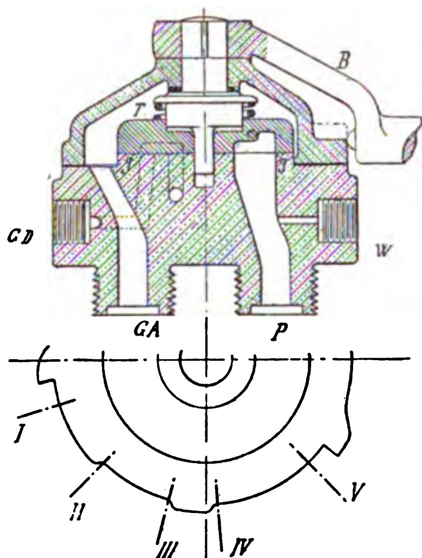


Fig. 931. — Robinet de manœuvre du frein Soulerin.



Fig. 932. — Pompe à air des automobiles électriques du New York, New Haven and Hartford R. R.

Freins de chemins de fer électriques. — Sur les chemins de fer électriques, les systèmes de freins automatiques en usage sur les chemins de fer ordinaires, et pour lesquels nous renvoyons aux traités spéciaux, trouvent tout naturellement leur application. La seule différence consiste, comme nous l'avons déjà fait remarquer, dans le mode de commande de la pompe à air. Le plus généralement, cette pompe est actionnée par un moteur électrique spécial avec ou sans engrenages.

Sur les automobiles électriques du New York, New Haven and Hartford R. R. par exemple, on emploie le frein Westinghouse ordinaire. Le compresseur (fig. 932) est monté sur l'une des plates-formes et formé d'une pompe verticale à double corps, attaquée directement par un moteur électrique dont la carcasse inductrice prolongée sert de base aux cylindres. Cette pompe, qui débite 1,470 m³ d'air par minute, le comprime dans un réservoir principal, d'où il se rend à la conduite générale en traversant le robinet du mécanicien. A la vitesse de 250 tours le moteur absorbe, pour comprimer l'air à 6,5 kg. de pression, un cou-

rant de 16 amp. sous 600 volts, soit 13 chev. environ ; mais la consommation moyenne est, bien entendu, très inférieure.

Le fonctionnement du moteur est réglé automatiquement par un appareil consistant essentiellement, comme les régulateurs décrits plus haut, en un cylindre contenant un piston équilibré, sur lequel agit l'air du réservoir principal et dont la tige porte des contacts servant à interrompre ou à rétablir le circuit électrique ; ce régulateur fonctionne sous des différences de pression de 0,35 à 0,50 kg.

Sur le Metropolitan Elevated R. R. de Chicago, les voitures sont munies

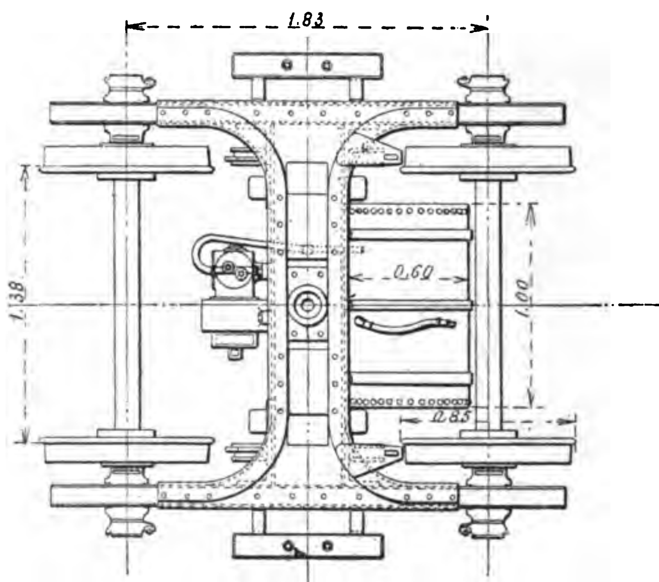


Fig. 933. — Compresseur d'air monté sur un bogie.

de freins à air comprimé directs avec cylindre additionnel de renforcement. L'air est comprimé à la pression de 4,2 kg. par une pompe verticale actionnée par un moteur de 3 chev. environ ; le jeu de cette pompe est encore réglé automatiquement par la pression de l'air des réservoirs et peut aussi être réglé à la main de chaque extrémité de la voiture ; l'ensemble du compresseur électrique et du régulateur automatique est placé dans l'une des cabines de manœuvre.

Pour affranchir les voyageurs du bruit désagréable produit par le compresseur, on peut avec avantage monter cet appareil sur le bogie non moteur, quand il y en a un ; la figure 933 représente un truck où la pompe et le réservoir principal sont ainsi fixés de chaque côté de la traverse maîtresse. Cette disposition a de plus l'avantage de faciliter les réparations, car il suffit de retirer le bogie de dessous la voiture pour rendre accessibles tous les appareils de compression.

Tous les freins que nous avons cités jusqu'ici sont à air comprimé. L'emploi des freins à vide sur les automobiles ou les locomotives électriques soulève une

difficulté, par suite de l'impossibilité d'employer l'éjecteur à vapeur d'un usage si commode sur les locomotives ordinaires. On est obligé d'avoir recours à une pompe : celles que nous avons décrites pourraient être utilisées dans ce but en renversant simplement les clapets ; comme exemple de pompe à vide spéciale pour véhicules électriques, nous citerons l'appareil à commande directe par l'essieu qui a été construit par la Standard Air-Brake Co. pour la locomotive électrique d'essai à accumulateurs du Manhattan Elevated R.R. de New York. Cette pompe (fig. 934), qui repose d'un côté sur l'essieu intérieur d'un des bogies, est suspendue de l'autre aux entretoises médianes par l'intermédiaire de ressorts ; elle est en deux moitiés, comprenant chacune un cylindre et qui sont boulonnées ensemble autour de l'essieu, sur lequel est calée une poulie d'excentrique unique en acier coulé.



Fig. 934. — Pompe à vide de la locomotive électrique d'essai du Manhattan Elevated R.R. de New York.

Inconvénients des freins pneumatiques. — Les freins pneumatiques, malgré leurs avantages, ne sont pas les plus rationnels pour des matériels électriques. Ils ne sont pas, en effet, dans les cas ordinaires, chargés par un moteur spécial comme sur les locomotives à vapeur, mais par un essieu de la voiture : le compresseur électrique est trop coûteux pour être d'un emploi fréquent. La pression s'abaisse donc en proportion de la fréquence du fonctionnement des freins, et, si l'on fait appel à ceux-ci plu-

sieurs fois de suite à des intervalles très rapprochés, ils peuvent se trouver inefficaces. D'autre part, ils entraînent une dépense d'énergie supplémentaire empruntée à la ligne. Ils sont lourds, encombrants et coûteux. Enfin, ils ont le défaut d'amener ordinairement le blocage des roues, d'où résultent une production de « plats » sur celles-ci et une usure des rails, en même temps que des réactions désagréables pour les voyageurs.

Tous les freins à frottement donnent lieu, du reste, pendant l'arrêt à une accélération négative, qui apparaît brusquement au moment de la mise en prise et augmente au fur et à mesure que la vitesse décroît, par suite de l'augmentation du coefficient de frottement mis en évidence par la figure 912, jusqu'au moment de l'arrêt, où cette accélération cesse brusquement. Il résulte de cette discontinuité, si elle n'est pas adoucie par une manœuvre attentive du frein modérable, la sensation pour les voyageurs de deux chocs successifs en sens contraire, ce qui est très pénible en cas d'arrêt brusque. Il est surtout difficile d'empêcher le calage brusque du frein à la fin du ralentissement : la courbe type de l'arrêt d'un train du Metropolitan Elevated de Chicago (fig. 935) montre que la variation de vitesse, bien qu'adoucie au début du freinage, donne lieu à un à-coup à la fin ; l'angle net de la ligne de vitesse avec l'axe des abscisses devrait être remplacé par un arc de courbe arrivant tangentiellement à cet axe.

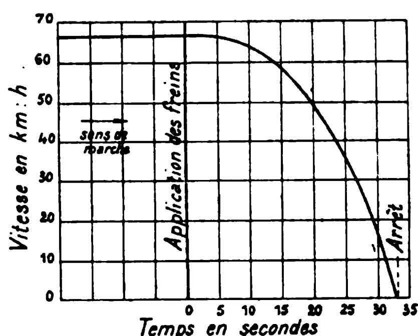


Fig. 935. — Courbe type de la vitesse en fonction du temps pendant le freinage d'un train de métropolitain américain.

Ces inconvénients peuvent être évités plus sûrement par l'emploi des freins électriques dont nous allons parler maintenant et dont la modération est absolument automatique.

Freins électriques. — Il était naturel sur des voitures mues par l'électricité de demander au même agent, de préférence à tout autre, la puissance nécessaire pour le freinage : la traction élec-

trique a donc attiré de nouveau l'attention des ingénieurs sur les freins électriques, un peu oubliés depuis l'invention du frein Achard, et un grand nombre de dispositifs ont été imaginés, parmi lesquels nous citerons seulement les principaux, qui s'appliquent plus spécialement aux tramways, les chemins de fer étant tous aujourd'hui munis de freins à air.

Ils peuvent se classer en trois catégories :

Les freins à entraînement, où l'électricité n'intervient que pour déterminer le serrage des freins par une force étrangère empruntée à la force vive de la voiture ;

Les freins-dynamos constitués par les moteurs mêmes de la voiture, employés soit pour caler les roues, soit pour transformer la force vive en chaleur ;

Les freins électro-magnétiques, dans lesquels un frottement est produit par un électro-aimant de forme convenable.

Nous allons examiner successivement ces divers appareils.

1° Freins à entraînement. — Les premiers ont été imaginés à une époque où l'on ne connaissait pas le moyen de produire par l'emploi direct d'un courant des efforts assez intenses pour le freinage. Le premier et le plus connu est le frein *Achard*, qui a valu à son inventeur le prix Montyon en 1865 et a servi de prototype à de nombreux appareils analogues et moins parfaits (Masui, Parck, Waldumer, etc.) ; il a été perfectionné dans des essais successifs exécutés sur les chemins de fer de l'État belge, de l'Est, du Nord et de l'État français [1].

Sous sa forme définitive, représentée par la figure 936, il se compose d'un électro-aimant droit A A, dont le noyau central porte une bobine évidée en son milieu et aboutit à deux pôles circulaires fortement saillants *m*, *n*. Cet électro est suspendu comme un pendule par deux étriers *h*, *h* en face de l'essieu *d* du véhicule. La partie centrale évidée sert de treuil à une chaîne qui commande les leviers du frein en passant sur deux poulies de renvoi indépendantes des bielles de suspension. Un seul électro peut ainsi actionner par chaînes tous les sabots d'une voiture.

Lorsque aucun courant ne passe, les freins sont desserrés et l'électro A est

[1] On trouvera un intéressant compte rendu de ces essais dans les articles de MM. E. Sartiaux et Weissenbruch dans le *Bulletin de la Commission du Congrès international des Chemins de fer*.

immobile. Quand le mécanicien envoie le courant, l'électro étant magnétisé, ses deux pièces polaires *m*, *n* viennent se coller contre l'essieu, en formant une poulie aimantée qui se trouve entraînée par celui-ci ; la chaîne s'enroule autour du noyau et serre les freins avec une force limitée par le glissement de l'essieu sur l'électro ; ce glissement est réglé par l'intensité du courant, et le mécanicien peut ainsi modérer le serrage à l'aide d'un rhéostat parcouru par ce courant.

Un train muni du frein Achard a circulé pendant quatre ans sans aucune interruption ni avarie entre Tours et les Sables-d'Olonne, et les résultats ont été des plus satisfaisants; il eût été adopté sur le réseau de l'Etat, si les compagnies voisines n'eussent pas déjà adopté les freins à air.

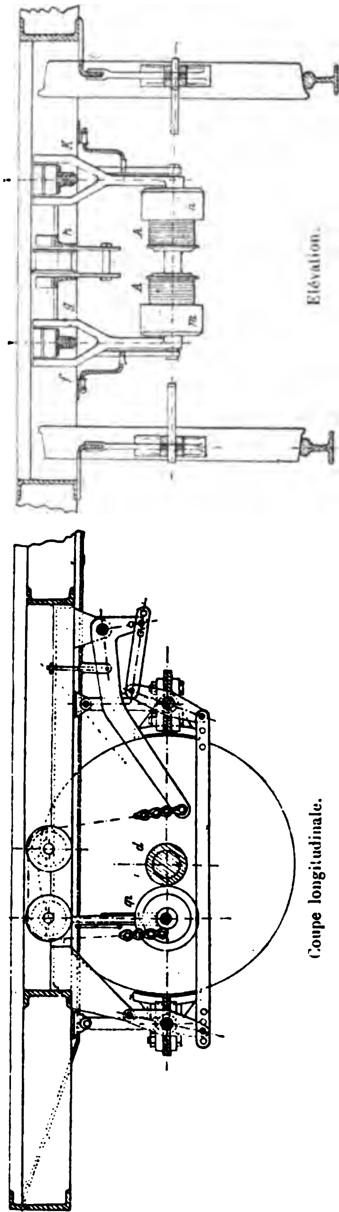


Fig. 936. — Frein électrique à entraînement, système Achard.

Ce frein n'a jamais reçu aucune application sur les tramways, et l'on peut s'en étonner[1] parce qu'il est simple, robuste et peu dispendieux ; d'ailleurs, un dispositif analogue de frein à entraînement a été employé avec succès en Amérique par M. Sperry, concurremment avec son frein électromagnétique direct dont nous parlons plus loin. Dans le système Achard, les électros étaient alimentés par une batterie ou une dynamo spéciale ; dans le système Sperry, le courant est emprunté aux moteurs mêmes de la voiture, qu'on fait fonctionner en générateurs après avoir rompu leur connexion avec la ligne ; ce dernier dispositif est le plus

[1] Sur les voitures automobiles, son emploi ne serait pas possible avec certains types

simple ; on ne doit pas songer, d'ailleurs, à demander au réseau le courant nécessaire au freinage, car on s'exposerait à des accidents en cas de déraillement du trôlet ou d'une interruption quelconque du courant. Enfin, on a modifié le frein Achard de façon à en rendre le fonctionnement automatique en cas de rupture d'attelage : le courant envoyé par le mécanicien a alors pour effet de maintenir ouverts des relais, qui, lorsqu'ils se ferment, mettent les électros en circuit avec des batteries locales disposées sur chaque véhicule.

Le frein Achard serait d'un emploi tout indiqué sur les voitures d'attelage, à cause de la faible dépense d'installation et du fonctionnement très sûr de cet appareil. Sur les automobiles, on peut préférer les suivants.

2° *Freins-dynamos.* — Le système des freins-dynamos, peu

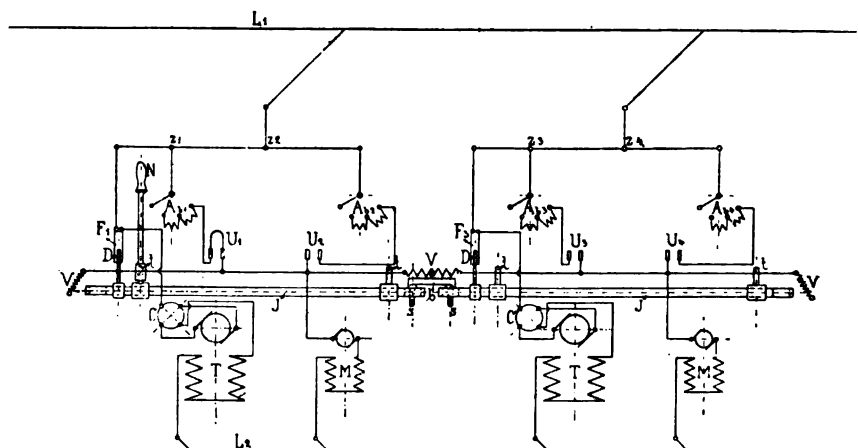


Fig. 937. — Système de freinage électrique à fonctionnement automatique Siemens et Halske.

employé à cause de sa complication, consiste dans l'emploi de petits moteurs électriques commandés par un circuit spécial et qui serrent ou desserrent les sabots de frein. En les disposant de façon convenable, on peut rendre le serrage automatique en cas d'une rupture d'attelage ou de courant.

de moteurs, tels que le moteur Walker, qui embrassent complètement l'essieu ; avec les autres types ou pour les voitures remorquées, il est extrêmement facile à adapter à un matériel existant.

Comme exemple bien étudié de ce système, nous citerons un dispositif de *Siemens et Halske* breveté en 1894 et qui complète le système de régulation simultanée de toutes les voitures d'un train décrit plus haut (p. 260).

Chaque voiture comprend (fig. 937), en outre de son moteur principal TC, une petite dynamo M alimentée par un fil V disposé tout le long du train et recevant le courant par la première voiture, avec retour par les rails. Cette dynamo, lorsqu'elle est parcourue par le courant, desserre les freins retenus par un ressort antagoniste non représenté jusqu'à ce que les deux forces se fassent équilibre; en cas de rupture d'attelage, les voitures qui restent en arrière étant privées du courant du fil V, les freins ne sont plus retenus par la dynamo et se serrent sous l'action du ressort. Le courant de la dynamo est réglé par un rhéostat Ab. Chaque voiture, pouvant être éventuellement véhicule de tête, est munie sur chaque plate-forme d'un rhéostat semblable et d'un interrupteur U. On ne ferme que l'interrupteur de la plate-forme sur laquelle se trouve le mécanicien, de façon qu'un voyageur ne puisse produire d'effet fâcheux en manœuvrant un des rhéostats non utilisés.

Les tringles J qui courent le long du train servent à la manœuvre du régulateur de vitesse (p. 260).

Ce système ingénieux ne parait pas avoir reçu d'applications pratiques. Nous n'y insisterons donc pas davantage.

3° ***Freinage par les moteurs.*** — Le freinage par les moteurs peut se faire par deux méthodes distinctes : l'inversion de marche et la mise en court-circuit.

Nous avons indiqué plus haut (p. 180) les procédés à employer, à propos de la régulation des moteurs dont c'est en réalité une combinaison accessoire, et nous n'y reviendrons pas. Mais il est bon d'examiner ici les résultats qu'on peut attendre de ces procédés au point de vue de l'arrêt des voitures comparativement aux systèmes précédents.

a. *Inversion de marche.* — Si l'on intervertit le sens de rotation des moteurs de façon à leur faire exercer leur effort en sens opposé au mouvement, comme dans la marche à contre-vapeur pour les locomotives, et si l'effort à la jante des roues reste inférieur à l'adhérence, il y a production d'un travail négatif qui absorbe la force vive ; si l'effort dépasse l'adhérence, les roues se mettent à patiner en tournant en sens inverse.

Appelons encore a le coefficient d'adhérence, f le coefficient de frottement pendant le patinage, F l'effort à la jante des roues exercé par les moteurs ; la puissance vive retirée à la voiture par un parcours e sera

Fae, s'il n'y a pas patinage,
Ffe, s'il y a patinage.

Dans ce dernier cas, la circonférence e' décrite par un point de la roue pendant le même temps sera plus grande que e; le moteur fournira donc un travail supplémentaire

$$Ff(e' - e),$$

mais ce travail, emprunté entièrement au courant électrique, ne contribuera en rien au freinage.

L'effet de l'inversion de marche ne saurait donc jamais, comme l'ont prétendu certains auteurs, être supérieur à celui des freins ordinaires, lorsque ceux-ci ont une puissance suffisante pour amener le calage des roues ; on a vu, du reste, plus haut (p. 181) les inconvénients qui doivent faire interdire l'emploi de ce mode de freinage aussi brutal pour les moteurs que dangereux pour les voyageurs.

b. *Mise en court-circuit.* — Les moteurs sont mis hors circuit par rapport à la ligne, puis fermés sur eux-mêmes, avec intercalation de résistances extérieures, s'il y a lieu ; ils fonctionnent alors comme des dynamos génératrices sous l'action des engrenages actionnés par l'essieu, en empruntant à la force vive de la voiture un travail qui se transforme en chaleur dans le moteur et la résistance.

L'expérience montre qu'on peut obtenir par ce moyen un effort résistant aussi puissant qu'on le désire et utiliser complètement l'adhérence jusqu'à la limite. S'il y a patinage, il ne saurait être d'ailleurs que partiel, car la réduction de vitesse du moteur qui en est la conséquence entraîne une réduction du courant et par suite de l'effort résistant appliqué à la jante, et cet effort tomberait à zéro s'il y avait patinage complet. Il y a donc une sorte de limitation automatique de l'effet du frein, qu'on peut achever de rendre parfaite en intercalant des résistances convenables dans le circuit; on peut réduire celles-ci au fur et à mesure que la vitesse se ralentit, de façon à maintenir un courant aussi élevé que possible; ce genre de frein a donc un rendement très élevé et évite en tout cas la production de plats sur les roues.

Ce mode de freinage ne s'applique qu'aux moteurs à courant continu, les autres ne pouvant s'exciter eux-mêmes; il convient mal aux moteurs shunt (à excitation non séparée), par suite du risque qu'ils courent de se désamorcer si l'on réduit trop la résistance en circuit avec l'induit.

Les conditions du freinage par les moteurs en régime permanent (ce qui en constitue l'emploi le plus précieux sur les lignes à longues pentes) peuvent s'étudier avec précision par une méthode toute semblable à celle que nous avons indiquée plus haut (p. 179) pour l'étude de la récupération. Soit, par exemple, une voiture de 7 t. équipée avec un moteur série défini par les courbes de vitesse

et d'effort de la page 88, que nous reproduisons ici (fig. 938). La courbe en pointillé indique pour chaque valeur du courant l'effort effectif produit à la jante des roues par la dynamo fonctionnant comme moteur à 500 volts. L'effort théorique, c'est-à-dire celui que donnerait un moteur sans pertes dans le fer ni frottements, est représenté par la droite passant par l'origine

$$F = \frac{\frac{(U - rI)\,I}{9{,}81\ V}}{3{,}6},$$

U étant exprimé en volts (500), I en ampères, V en kilomètres à l'heure et F en kilogrammes. La différence entre les ordonnées de cette droite théorique et celles

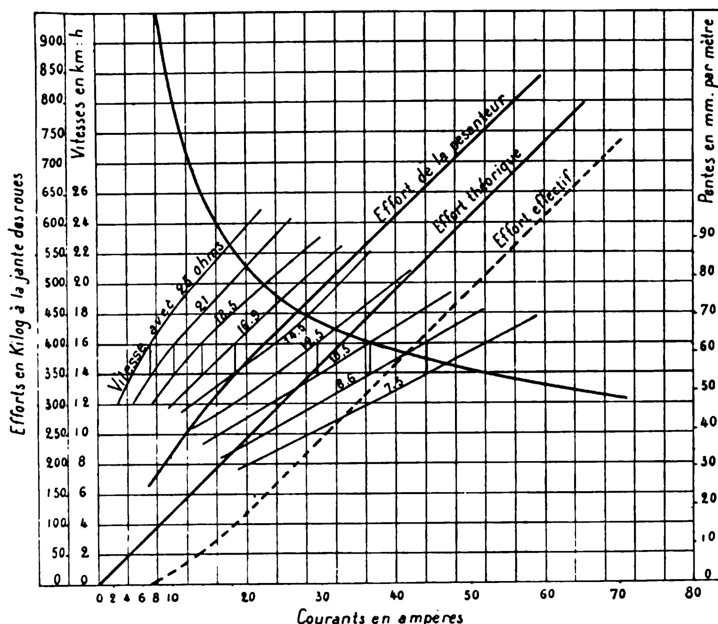


Fig. 938. — Étude graphique du freinage d'une voiture de 7 t. équipée avec un moteur série de 15-25 chev., avec différentes résistances en série, d'après les courbes caractéristiques du même moteur en marche normale.

de la courbe effective représente l'effort consommé par les diverses pertes dont le moteur est le siège et les frottements dans les coussinets et les engrenages.

Lorsque la dynamo fonctionne en génératrice, l'effort perdu reste le même à courant égal ; en reportant cet effort perdu au-dessus de la courbe théorique, on obtient donc en ordonnée l'effort que la pesanteur doit produire, lorsque la voiture descend une pente, pour que la dynamo débite le courant indiqué par l'abscisse correspondante. L'effort produit par la pesanteur sur une voiture descendant la pente i avec un coefficient de traction β étant calculé par l'expression $P(i - \beta)$, on en déduit par cette courbe le courant correspondant à chaque déclivité.

Quant à la vitesse V' sur la pente, on l'obtient à son tour en fonction de la vitesse V qui correspond au même courant en marche normale et par suite à la même excitation, en prenant le rapport des forces électromotrices induites,

$$\frac{V'}{V} = \frac{(R + r)\,I}{U - rI + \varepsilon},$$

r étant la résistance du moteur et R celle du rhéostat ajouté en série avec lui.

Il est donc facile, en négligeant la réaction d'induit ε, de calculer par points un faisceau de courbes de vitesse correspondant à des valeurs quelconques de R. Par exemple, avec le moteur considéré dont la résistance est de 0,7 ohm, si l'on prend une résistance R = 7,5 ohms, on devra multiplier les ordonnées de la caractéristique de vitesse donnée par

$$\frac{(7{,}5 + 0{,}7)\,I}{500 - 0{,}7\,I}.$$

Toutes ces courbes ont évidemment leurs ordonnées proportionnelles.

Grâce à cette remarque, les résistances d'un rhéostat destiné au freinage d'après cette méthode peuvent être aisément déterminées sur l'épure de façon à maintenir la vitesse entre deux limites fixées, par exemple entre 14 et 16 km : h. Supposons que la résistance maxima soit de 25 ohms ; on trace la courbe correspondante jusqu'à l'horizontale 16 et l'on cherche la résistance x qui sous le même courant ramène la vitesse à 14 km : h. par la formule

$$\frac{0{,}7 + x}{0{,}7 + 25} = \frac{14}{16},$$

d'où

$$x = 21 \text{ ohms}.$$

On trace la nouvelle courbe et ainsi de suite.

Quant à la résistance maxima, on la détermine par la condition qu'à la vitesse maxima, la mise en court-circuit sur cette résistance ne produise pas sur la première touche un effort retardateur supérieur à 40 ou 50 kg. par tonne.

La figure montre que la résistance de 25 ohms que nous avons adoptée donne à la vitesse de 20 km : h. un courant de 13,5 amp. et, par suite, un effort résistant retardateur d'environ 275 kg.; s'il s'agit d'une voiture de 7 t., cet effort correspond à 40 kg. par tonne environ. Si l'on doit atteindre 25 km : h., la résistance devra être augmentée en conséquence ; on la réduit ensuite pendant le freinage pour accroître la puissance de celui-ci.

Comme exemple de l'ordre de grandeur des valeurs adoptées pratiquement, nous citerons les voitures du tramway de Fontainebleau, qui pèsent 10 t. en charge ; le freinage par les moteurs se fait à l'aide d'un rhéostat à 5 touches gradué empiriquement de 5 à 40 ohms au maximum.

Les méthodes de freinage par les moteurs ont le grave inconvénient de soumettre les induits à des secousses brusques défavorables à leur conservation et d'amener des bris de dents et en

tout cas une usure rapide des engrenages soumis de ce chef à un travail exagéré ; les conditions de fonctionnement du pignon attaqué par la roue sont d'ailleurs beaucoup moins favorables qu'en marche normale, où c'est l'inverse qui a lieu.

Aussi toutes les compagnies américaines qui ont employé ce procédé l'ont-elles abandonné en faveur des freins électromagnétiques, qui reportent directement sur l'essieu l'effort principal. La grande simplicité et la sécurité du système du court-circuit[1] peuvent cependant continuer à en justifier l'emploi, à condition qu'il soit considéré seulement comme un frein de secours à utiliser exceptionnellement lorsque les autres freins de la voiture sont insuffisants ou hors de service.

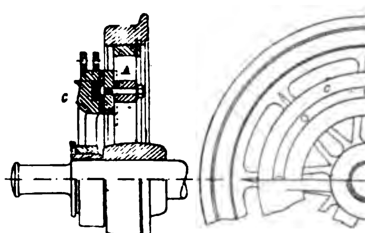
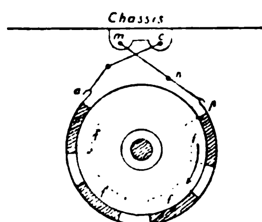
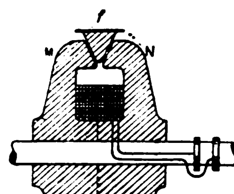


Fig. 939. — Frein magnétique Forbes et Timmis.

4° *Freins électromagnétiques.* — Les freins magnétiques reposent sur le même principe que les embrayages magnétiques : ils consistent dans l'emploi d'électro-aimants qui, lorsqu'on y fait passer un courant, produisent un frottement contre les flancs ou la jante des roues ou contre un tambour calé sur l'essieu.



Elévation.



Coupe axiale.

Fig. 940. — Frein magnétique de Bovet.

Le premier système de ce genre qui ait été imaginé parait être celui de *Forbes* et *Timmis* (fig. 939), qui consiste en un électro-aimant annulaire *c* suspendu au châssis de la voiture et pouvant venir se coller contre une armature également circulaire A fixée à la roue; le frottement qui se développe entre les surfaces en contact produit un freinage énergique. Ce système ne semble pas avoir été mis en service effectif.

[1] M. Fischinger rapporte, par exemple, qu'il a pu arrêter en 7 à 8 m. par ce procédé une voiture à deux moteurs lancée à la vitesse de 22 km : h.

Il en est de même du système fort ingénieux de M. *de Bovet*, qui consiste en un électro-aimant circulaire (fig. 940) formé d'une bobine excitatrice annulaire logée entre deux flasques M, N et attirant dans sa gorge de forme triangulaire quatre sabots *f* en forme de coin. Cet électro est calé sur l'essieu, tandis que les coins sont fixés à une lame flexible circulaire dont les deux extrémités *a* et *p* sont reliées au châssis du truck par un système de bielles à trois articulations *abc*, *mnp*, destinées à permettre les déplacements relatifs de la lame sans réactions aux extrémités.

En temps normal, les sabots sont desserrés par le fait de l'élasticité de la lame, et celle-ci repose à sa partie inférieure sur une pièce formant matelas, fixe par rapport à l'essieu; on ne laisse aux sabots que très peu de jeu, pour qu'ils puissent être attirés lorsqu'on envoie le courant, ce qui produit le frei-

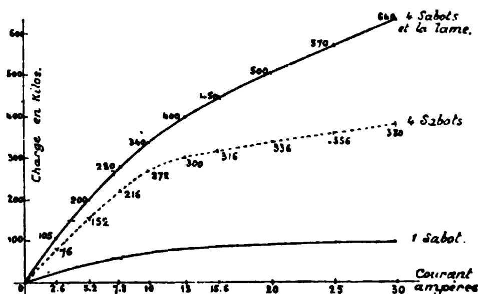


Fig. 941. — Effort tangentiel total sur la poulie d'un frein de Bovet en fonction du nombre des sabots.

nage par frottement. On peut régler le serrage des coins en faisant varier le courant par un rhéostat.

Ce système est, comme on le voit, équivalent à un frein à sabots, la force employée pour serrer ceux-ci étant seulement différente. Mais, en fait, l'emploi d'une gorge triangulaire et la solidarisation des sabots par une lame paraissent accroître la puissance du frein. L'effet de la lame est rendu bien visible par la comparaison des courbes d'effort tangentiel total obtenues respectivement avec un seul sabot, avec 4 sabots séparés et avec 4 sabots réunis par une lame (fig. 941) ; ces courbes, qui résultent d'essais effectués dans les ateliers des constructeurs, MM. Sautter-Harlé, montrent que les effets du freinage se produisent très bien avec une faible dépense d'énergie (50 watts environ par essieu pour produire un effort tangentiel d'environ 600 kg.).

On pourrait donc tirer un excellent parti de cet appareil pour le freinage des voitures de tramways, en lui donnant des dimensions convenables et l'alimentant avec le courant des moteurs, comme dans le procédé suivant; mais il a l'inconvénient d'exiger des contacts frottants pour l'amenée du courant à la bobine qui tourne avec l'essieu.

Sur les tramways américains et européens, on introduit aujourd'hui avec une faveur croissante les freins électromagnétiques du type *Sperry*, qui, inventés dès 1889, ont subi depuis cette

époque entre les mains de divers constructeurs une série d'essais et de modifications qui en font aujourd'hui des instruments parfaitement étudiés et pratiques.

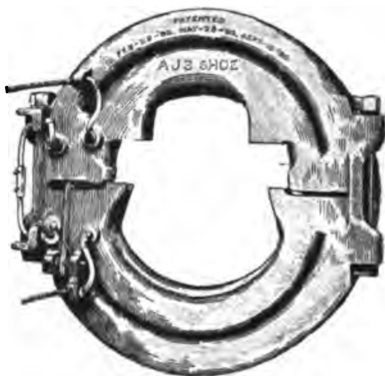
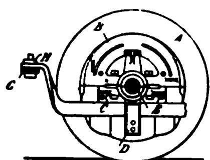
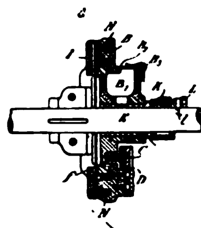


Fig. 942. — Frein électromagnétique de la General Electric Co. — Vue d'ensemble de l'inducteur.

Le frein *Sperry* original présente une grande analogie de forme avec celui de Forbes et Timmis; il agit comme lui sur un plateau circulaire fixé aux rais des roues, mais il en diffère par plusieurs points qui le rendent supérieur. Le noyau de l'électro, au lieu d'être circulaire, présente la forme d'un croissant interrompu sur une certaine largeur, suffisante pour permettre de le mettre en place ou de l'enlever sans avoir à démonter les roues. La bobine excitatrice est d'abord enroulée suivant une forme circulaire, puis repliée sur elle-même et placée autour du noyau dans une rainure qu'on remplit d'un



Suspension d'un frein isolé et attache avec le truck.



Coupe axiale.
I. disque. — E, essieu. — N, rainures de l'enroulement.

Fig. 943. — Frein électromagnétique de la General Electric Co. — Détails.

isolant plastique et qu'on ferme hermétiquement en y coulant un alliage; celui-ci protège la bobine et donne à l'électro-aimant une surface extérieure

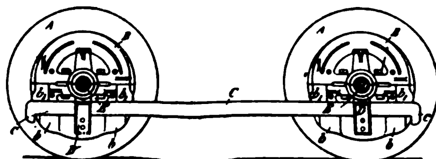


Fig. 944. — Suspension par paires des freins électromagnétiques de la General Electric Co.

entièrement lisse et métallique. Les extrémités de la bobine sont prolongées à l'extérieur par des fils flexibles servant à l'amenée du courant. En temps ordinaire, l'électro est maintenu décollé par un ressort. Pour le freinage, on rompt la connexion des moteurs avec la ligne et on les ferme en court-circuit

sur les électro-aimants des essieux ; ceux-ci viennent au contact de leurs armatures circulaires et donnent lieu à un frottement intense, qu'on peut régler en introduisant dans le circuit plus ou moins de résistance.

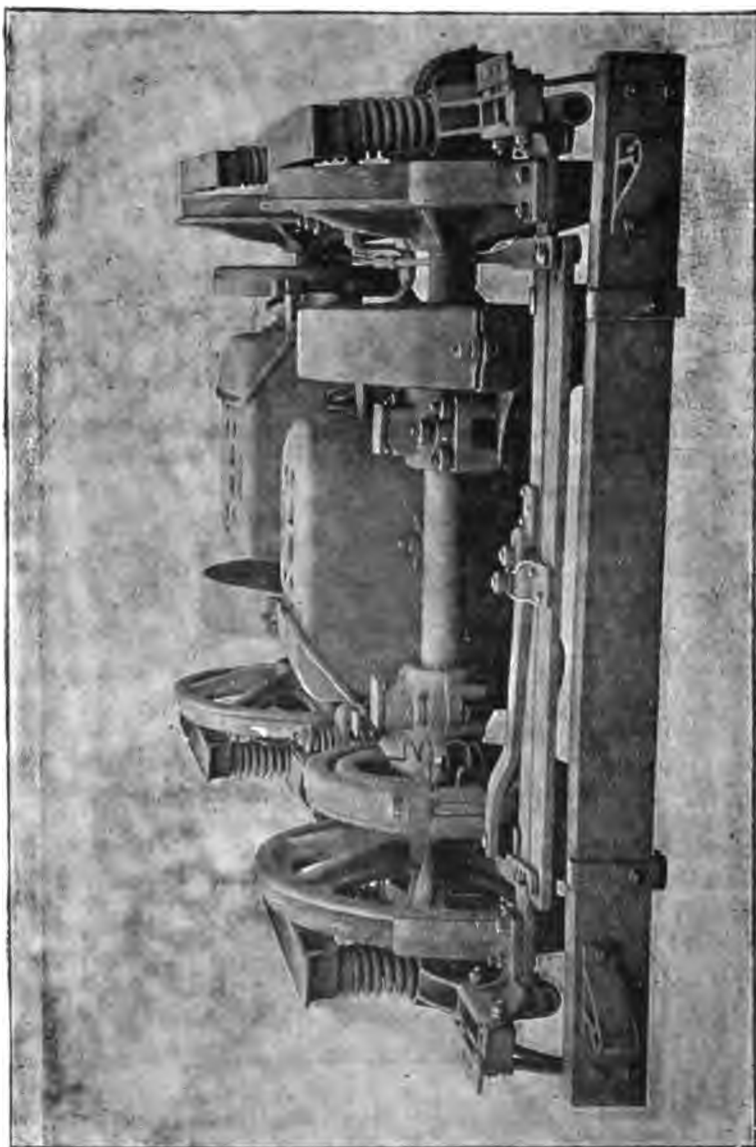


Fig. 915. — Truck muni de deux freins électromagnétiques de la General Electric Co.

M. Sperry a construit aussi un frein d'entrainement d'après le même principe, en employant une armature folle sur l'essieu et servant de treuil à la chaine de serrage d'un frein à sabots. Cette forme est aujourd'hui abandonnée

en faveur du dispositif précédent, soit qu'on place tous les freins d'un train en série, soit qu'on les mette en action pour chaque voiture à l'aide de servo-moteurs commandés de la plate-forme du mécanicien.

La *General Electric Co.* a remplacé dans son frein *Case* l'électro unique en croissant de Sperry par deux demi-croissants construits de même et produisant deux pôles conséquents à leurs jonctions. La figure 942 montre l'aspect extérieur de l'inducteur, et la figure 943 en donne la coupe et le mode de suspension contre l'un des paliers d'essieu. Pour empêcher l'inducteur de tourner, on l'attache au truck, comme dans la figure 943, ou au moteur, ou bien on réunit les deux inducteurs par paires à l'aide d'une barre longitudinale (fig. 944). En tout cas, le disque formant armature est calé directement sur l'essieu.

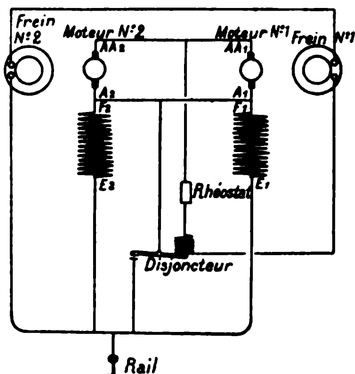


Fig. 946. — Principe du montage des freins électromagnétiques de la General Electric Co.

La figure 945 représente un truck équipé suivant le premier de ces dispositifs.

Les connexions sont disposées comme l'indiquent schématiquement les

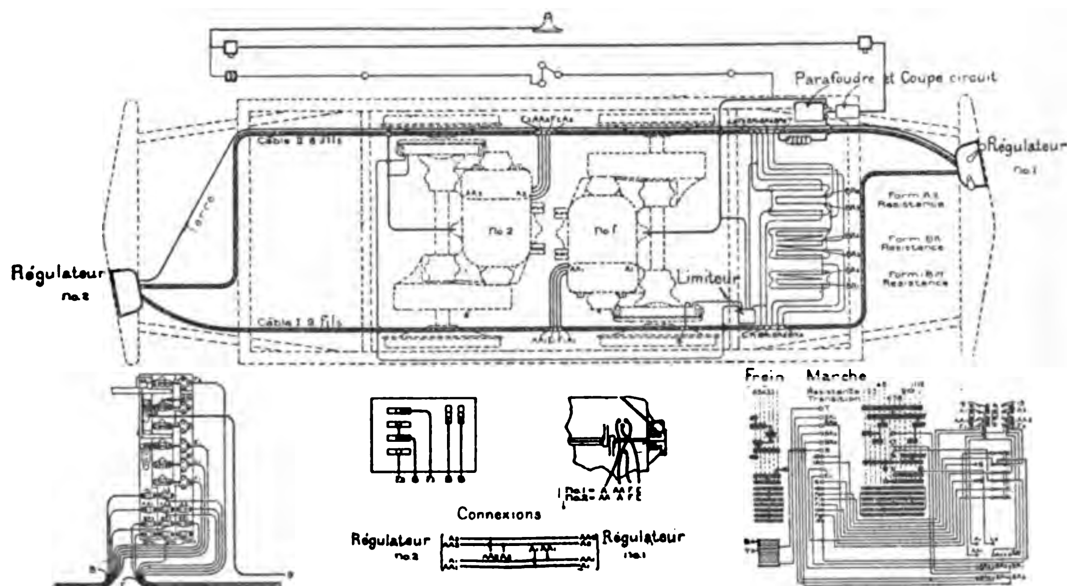


Fig. 947. — Schéma des circuits et appareils sur une voiture munie de freins électromagnétiques de la General Electric Co.

figures 946 et 947, de façon à fermer en parallèle les deux moteurs sur le circuit des freins; en même temps, on inverse le sens du courant dans les inducteurs des moteurs, comme nous l'avons expliqué plus haut (p. 182), pour les

rendre auto-excitateurs. Un rhéostat permet de régler le courant des freins et un disjoncteur supprime automatiquement ce courant en mettant les inducteurs des moteurs en court-circuit dès que l'intensité atteint la limite qui produirait le patinage des roues ; cette limite est de 30 à 35 amp. sur une voiture de tramways ordinaire, soit 15 à 18 amp. par moteur ; le disjoncteur

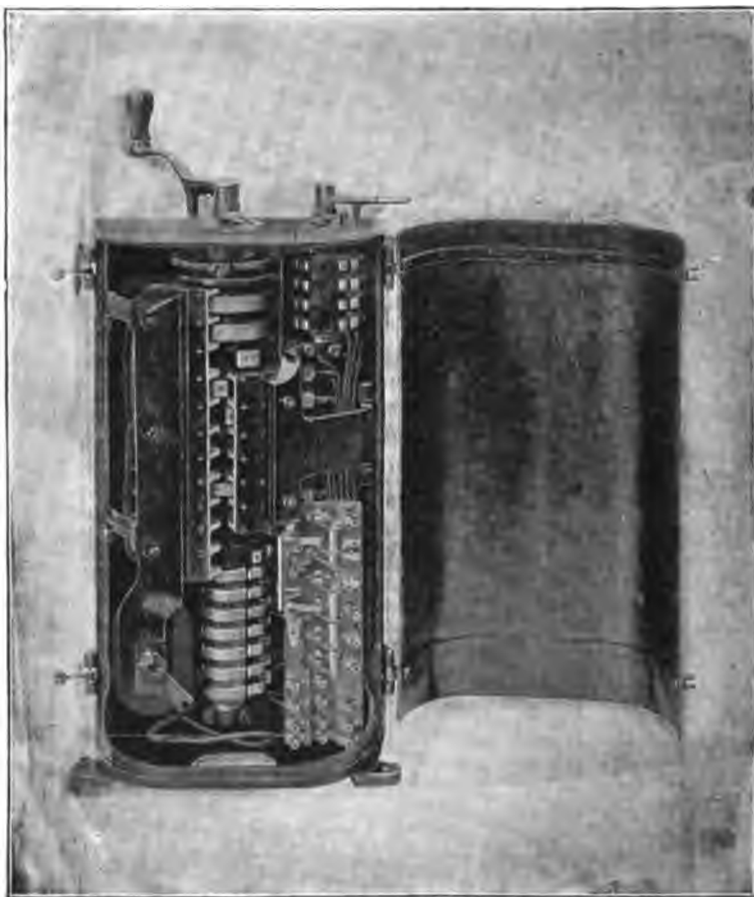


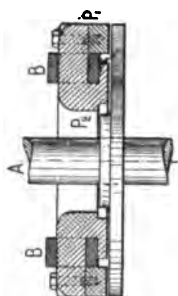
Fig. 948. — Régulateur pour frein électromagnétique de la General Electric Co.

est réglé empiriquement en tendant plus ou moins un ressort antagoniste.

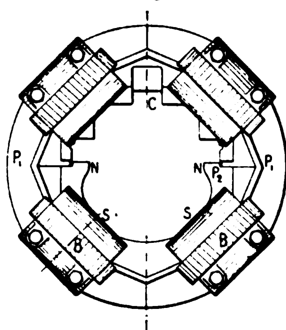
Toutes ces manœuvres sont effectuées très facilement, de même que les manœuvres de marche, à l'aide d'un régulateur de type spécial (fig. 948), analogue à celui décrit au chapitre X sous le nom de type K2, mais contenant les bagues supplémentaires nécessaires. Les voitures des tramways du Havre, par exemple, sont munies de ces freins et du régulateur BA.

Diverses compagnies ont construit des freins du même genre, mais avec des électro-aimants disposés d'une façon plus ordinaire. Par exemple, l'*Union*

Coupe transversale X_1X_2.



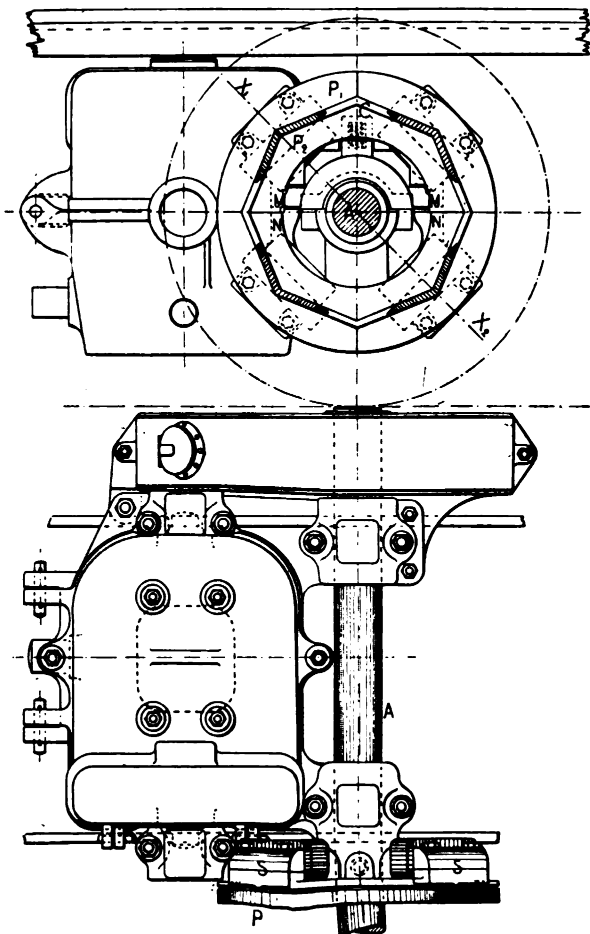
Elévation longitudinale.



Elévation transversale.



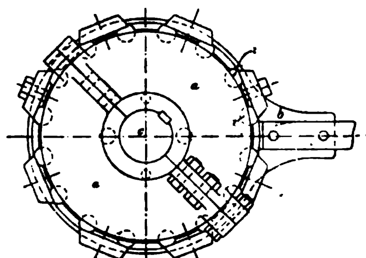
Coupe longitudinale.



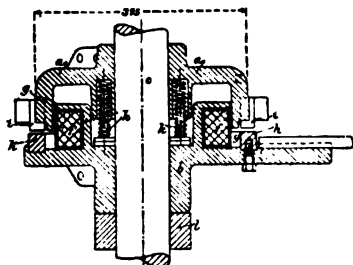
Vue en plan.

Fig. 949. — Frein électromagnétique de l'Union Elektricitäts-Gesellschaft. — Détails de l'appareil et de son montage.

Elektricitäts-Gesellschaft de Berlin emploie le dispositif représenté par la figure 949, qui indique en même temps le mode de montage du frein à côté du moteur. L'électro-aimant est formé de 4 noyaux en fer à cheval S semblablement disposés, excités par des bobines B et boulonnés sur des pièces polaires polygonales P_1, P_2 de polarité différente, laissant entre elles un entrefer. Cet inducteur est suspendu par l'épaulement C muni d'un ressort sur un croisillon en porte-à-faux venu de fonte avec le palier d'essieu du moteur; grâce au ressort, il peut, lorsqu'on l'excite, venir se coller sur un disque P claveté sur l'essieu; les bras du croisillon M, M, contre lesquels s'appuient des épaulements N, N ou un flasque latéral analogue à celui de la figure 950, l'empêchent de tourner.



Élévation.



Coupe.

Fig. 950. — Frein électromagnétique de la Société Kummer.

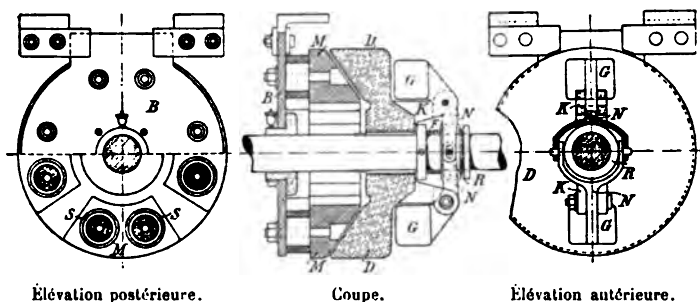
Ce dispositif paraît avoir l'inconvénient de ne donner lieu qu'à de faibles courants de Foucault, contrairement au précédent où les polarités des électro-aimants sont alternées.

Des freins analogues sont également construits par la maison *Siemens et Halske* de Berlin et par la Société *Kummer* de Dresde. Ce dernier appareil, représenté par la figure 950, est alimenté comme celui de Sperry par le courant emprunté au moteur après mise de celui-ci hors circuit (les commutateurs sont décrits à la page 232). Le frein proprement dit consiste en deux pièces annulaires ou couronnes de fonte ou d'acier concentriques *a* et *b* : l'une *a*, servant d'armature, est calée sur l'essieu *c*; l'autre *b*, montée folle sur celui-ci et retenue par un levier fixé au truck, contient la bobine excitatrice *f*, protégée contre la poussière et l'eau par une bague mince de laiton *g* qui la recouvre entièrement. Le circuit magnétique est fermé par des tiges courtes en fer *i*, fixées à la couronne *a* par des boulons qui permettent de les remplacer facilement, et ces tiges frottent contre une bague en fer *h* en deux parties également faciles à remplacer. La discontinuité du champ produit des courants de Foucault utiles. Le décollement est assuré par un ressort *k* et l'écart limité par une bague de réglage *l*. Avec 7 mm. d'écart, 20 w. suffisent pour produire l'attraction, et on dispose en pratique de beaucoup plus.

Pour utiliser le plus rationnellement possible le frein magnétique, il conviendrait d'en maintenir la puissance plus constante en accroissant peu à peu la perméabilité de son circuit magnétique au fur et à mesure que la vitesse décroît. M. *Déri* a proposé dans ce

but un système dans lequel l'entrefer entre les inducteurs et l'armature est modifié automatiquement par un régulateur à force centrifuge [1].

La figure 951 représente cet appareil en élévation et en coupe. Les inducteurs consistent en une série de noyaux d'électro-aimants S, M, de polarité alternée, boulonnés sur une culasse commune B, qui embrasse l'essieu et est fixée au truck à sa partie supérieure par des cornières ; les bobines de ces électros sont enfermées dans des enveloppes hermétiques en tôle qui les protègent contre la boue et l'humidité. L'armature D consiste en une masse de fonte enfilée sur l'essieu et entraînée par lui, mais qui peut se déplacer longitudinalement ; deux appendices venus de fonte K portent des tourillons autour desquels pivotent deux leviers coudés, munis d'un côté d'un contrepoids G et prenant appui



Élévation postérieure. Coupe. Élévation antérieure.

Fig. 951. — Frein électromagnétique Déri à réglage par la force centrifuge.

de l'autre côté sur deux ergots fixés à une bague N. La force centrifuge appuie cette bague contre un ressort spiral retenu par le collet F de l'arbre et décolle ainsi l'armature D des électros. La force du ressort et le nombre des ampères-tours des électros sont choisis de façon que l'armature ne vienne au contact que lorsque la vitesse tombe au-dessous d'une certaine valeur ; c'est alors seulement que le frottement intervient, tandis que pour les vitesses plus élevées le freinage est produit uniquement par les courants de Foucault et l'hystérésis.

Rôle des courants de Foucault dans les freins électromagnétiques. — L'expérience a montré un avantage important et inattendu en faveur des freins du genre Sperry : c'est que l'action retardatrice produite est bien supérieure à ce qu'on peut prévoir par le calcul de l'effort d'attraction magnétique subi par l'armature et la connaissance du coefficient de frottement des surfaces en contact; par exemple, pour un petit appareil d'essai, avec un courant de 20 amp. amenant la saturation du fer, l'effort, calculé à raison de 12,5 kg. d'attraction par cm^2 de pôle d'électro et un coefficient de frottement de 0,10, devait être de 720 kg., tandis qu'on a trouvé pratiquement 1 170 kg. et, en poussant le courant à 41 amp., on a pu, en dépit de la saturation, atteindre 1 650 kg.

Cette différence provient des courants de Foucault très intenses dont l'armature métallique et la surface opposée sont le siège au droit des extrémités du

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 22 juillet 1897.

croissant inducteur, où il y a une variation brusque de champ magnétique; l'électro en croissant et à surface métallique fermée présente à ce point de vue une supériorité d'effet remarquable par rapport à celui de Forbes et Timmis,

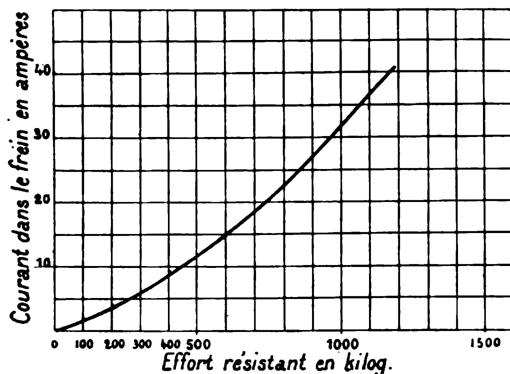


Fig. 952. — Effort statique à la jante produit à l'arrêt par un frein électromagnétique en fonction du courant.

qui ne peut donner lieu à aucun courant parasite. Pour augmenter encore ceux-ci et réduire en même temps l'usure des surfaces frottantes, M. Sperry lubrifie

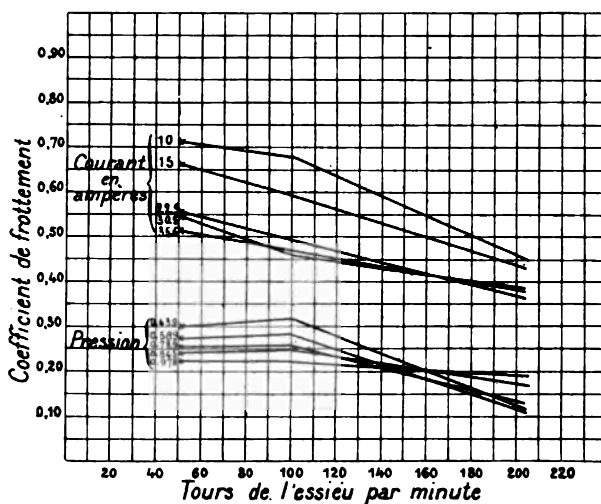


Fig. 953. — Différence entre les coefficients de frottement observés à la même vitesse et sous la même pression dans un frein électromagnétique suivant que la pression est produite mécaniquement ou par le courant.

l'armature par un frotteur en graphite logé dans la coupure du croissant; la poussière de graphite établit un passage facile pour les courants induits, qui se ferment à travers l'inducteur et l'armature, et le frein n'agit plus, pour ainsi dire, que par l'effet de ceux-ci.

Ce fait est mis en évidence par les courbes des figures 952 et 953, publiées par M. Baylor [1]. La première, qui indique les efforts statiques en fonction du courant. a servi à déterminer le courant nécessaire pour produire une pression mécanique donnée ; puis, en comparant les frottements obtenus suivant que cette pression est réalisée mécaniquement ou par le courant, on a obtenu les courbes de la figure 953. Celles-ci montrent que les courants de Foucault font plus que doubler l'effort retardateur dû à la pression.

Outre la difficulté de réduire l'usure des surfaces frottantes, on en a rencontré une autre provenant du collage de l'armature contre les inducteurs, après l'arrêt, par l'effet du magnétisme rémanent; on évite cet inconvénient en excitant par la première touche du régulateur un enroulement dérivé de grande résistance placé sur les électros en sens inverse de l'enroulement principal et calculé de façon à détruire le magnétisme rémanent.

Avantages des freins électriques. — Les freins du type Sperry présentent des avantages précieux qui les mettent au-dessus de tous les autres :

1° Leur action est sûre, instantanée, très énergique, et ne demande au mécanicien aucun effort ; le levier de commande peut être un de ceux du régulateur de vitesse, ce qui simplifie beaucoup la manœuvre et demande moins de présence d'esprit au mécanicien que lorsqu'il doit manœuvrer un levier spécial.

2° Leur fonctionnement est indépendant du courant de ligne ; il ne soumet d'ailleurs les moteurs à aucun effort dangereux, le courant qui leur est demandé étant faible et l'effort principal [2] de freinage reporté exclusivement sur les roues.

On peut, du reste, les rendre automatiques en fermant le circuit du freinage par un conjoncteur maintenu ouvert par le passage du courant des moteurs ; dès que le trôlet quitte le fil, la voiture est ainsi arrêtée automatiquement, ce qui est utile pour éviter d'endommager la ligne aérienne.

3° Le système assure aux freins leur rendement maximum, en même temps qu'il évite l'usure des roues, parce que le courant des moteurs, étant proportionnel à la vitesse, est limité automatiquement soit par l'effet du glissement, comme nous l'avons expliqué plus haut, soit par un interrupteur automatique de courant, qui est

[1] « Electric traction appliances », par M. A. K. Baylor, *Journ. Inst. El. Eng.*, 22 avril 1897.

[2] Le moteur agit lui-même comme frein pour la très faible quantité d'énergie qu'il transforme en courant électrique pour l'alimentation des électro-aimants.

pratiquement presque indispensable, par suite de l'inertie des armatures; son emploi évite sûrement les plats aux roues. En outre, la puissance du freinage croît d'elle-même aux grandes vitesses, comme cela est nécessaire pour produire un effort retardateur suffisant (voir p. 734).

4° L'action de ces freins est extrêmement douce et silencieuse, par suite de la loi même de variation de l'effort résistant. Celui-ci n'est pas à peu près constant pendant le freinage, mais il va en croissant progressivement à partir de zéro pendant le temps nécessaire à l'*amorcement* des moteurs comme dynamos; puis, si la résistance est constante, le courant décroît avec la vitesse, à laquelle il est proportionnel, jusqu'à zéro, ainsi que l'effort résistant qui en est

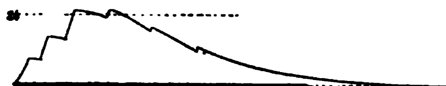


Fig. 954. — Variation du courant pendant le freinage dans un frein Sperry.

fonction ; en réduisant progressivement la résistance en circuit, on maintient au courant pendant la dernière partie de l'arrêt une valeur plus grande que celle qu'il aurait naturellement. La figure 954 représente, par exemple, sous forme de diagramme la variation du courant dans un frein Sperry pendant la durée d'un freinage.

Le couple produit par les courants de Foucault est proportionnel au flux et à la vitesse ; il décroît donc très vite avec celle-ci et l'on n'a de secousse ni au commencement ni à la fin du freinage le plus brusque ; la sensation éprouvée par les voyageurs est la même que si la voiture s'enfonçait dans un matelas à air. Aucun autre procédé n'agit avec autant de douceur.

5° Enfin, on peut, avec une seule voiture automotrice, freiner à la fois tous les essieux d'un train de voitures remorquées en nombre quelconque ; il suffit de munir celles-ci d'électros semblables, qu'on couple tous en série dans le circuit des freins de l'automobile par des fils volants ou des jonctions préparées d'avance. Rien n'est plus facile, par exemple, que d'installer à demeure aux deux extrémités des plates-formes des voitures des fils d'attelage robustes tels que ceux qui avaient été étudiés pour l'emploi du frein

Achard. La figure 955 représente avec détails cet accouplement, qui est formé de deux fils souples terminés par deux boîtes de forme spéciale qu'on emmanche l'une dans l'autre au moment où l'on accroche ensemble les voitures; dans cette position, les plaques en bronze des deux boîtes sont fortement pressées l'une contre l'autre et le frottement qu'on fait subir aux têtes en les faisant tourner pour l'accouplement suffit à maintenir leurs surfaces dans un état de propreté suffisant pour assurer le passage du courant; il est facile d'ailleurs de les nettoyer de temps en temps.

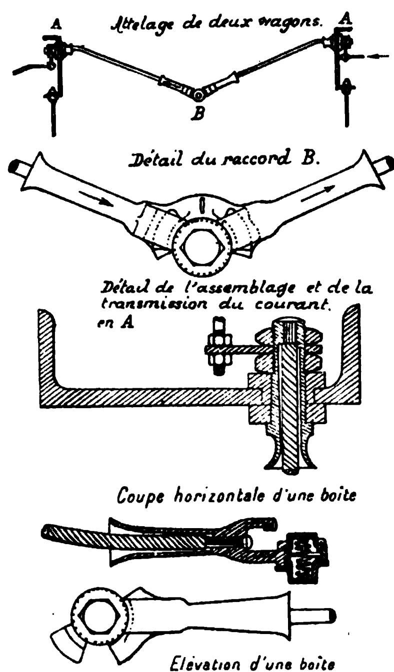


Fig. 955. — Détails de l'accouplement électrique des freins Achard.

Cette extension du freinage électrique aux voitures remorquées permet de réduire le personnel à un seul mécanicien, tout en assurant une sécurité plus grande que tous les autres systèmes et avec de moindres frais d'installation que l'air comprimé.

On a prétendu quelquefois[1] que l'usure des organes, particulièrement des collecteurs, balais et engrenages, qui accompagne l'emploi des moteurs comme freins électriques avec récupération compenserait largement l'économie réalisée sur l'énergie. Cette objection ne manque pas de valeur à première vue. Cependant, comme l'a fait remarquer avec raison M. Engelhardt[2], même dans ce cas cette usure est très faible et beaucoup moins importante que les détériorations produites par le mode d'exploitation ordinaire : celui-ci force, en effet, à freiner la voiture chaque fois qu'on pénètre sur une courbe ou sur une pente, et il arrive constamment, même aux mécaniciens les plus exercés, de rendre le courant à la voiture avant d'avoir desserré

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1897, n° 18, p. 259.
[2] Ibid., n° 20, p. 298.

les freins; il en résulte des étincelles aux balais qui endommagent le collecteur, des efforts exagérés qui fatiguent les engrenages, etc. On a constaté en pratique qu'avec un système de freinage électrique bien proportionné, permettant un freinage continu, on obtient, indépendamment de la question d'économie de courant, une grande commodité et une grande sécurité d'exploitation et une réduction notable de l'usure des sabots de frein.

Il en est de même a fortiori avec les freins électromagnétiques, qui n'imposent aux moteurs que des régimes et des efforts beaucoup plus faibles que la mise en court-circuit.

Pour tous ces motifs, le freinage électromagnétique nous semble présenter d'énormes avantages et il y aurait lieu d'en prescrire l'emploi sur tous les tramways électriques urbains, sans préjudice des freins ordinaires qu'on doit toujours conserver à titre de secours. Il est d'ailleurs nécessaire, pour produire et maintenir l'arrêt complet sur une pente, de recourir aux freins à sabots, parce que les freins électriques n'agissent qu'en marche (à moins qu'on n'entretienne leur courant par une petite batterie) ; mais ce n'est là qu'une sujétion très simple et peu gênante, qui ne constitue pas une objection contre l'emploi du frein électromagnétique. Le magnétisme rémanent produit du reste à lui seul une pression du frein très appréciable.

Théorie du freinage électrique. — Pour pouvoir comparer le freinage électrique au système du freinage mécanique appliqué à l'essieu ou à la jante des roues, il est intéressant d'établir une théorie approchée de ce freinage. Dans ce but, nous admettrons que le champ magnétique du moteur fonctionnant comme dynamo reste sensiblement constant pendant la durée du freinage, de sorte que le couple retardateur produit par le moteur varie proportionnellement au courant. Cette hypothèse est suffisamment exacte pour la pratique, comme le montrent les courbes expérimentales données plus haut pour divers moteurs, si l'on a soin de compter à part les couples parasites produits par le frottement des paliers et des engrenages, par l'hystérésis et les courants de Foucault.

Soient donc Φ le flux inducteur, I le courant qui traverse l'armature, J le courant équivalent aux courants de Foucault, C_h le couple dû à l'hystérésis, C_r le couple dû aux frottements du moteur et des engrenages. Le couple résistant produit sur l'essieu a pour valeur

$$C = \frac{N}{2\pi} \Phi (I + J) + C_h + C_r.$$

Le courant J est négligeable devant I ; quant à celui-ci, dans l'hypothèse où nous nous plaçons (flux Φ constant, résistance R du rhéostat constante), il est simplement proportionnel à la vitesse. Si nous appelons I_0 le courant produit à la vitesse initiale v_0, on pourra écrire pour expression de I à une vitesse quelconque v

$$I = I_0 \frac{v}{v_0}.$$

D'où

$$C = \frac{N}{2\pi} \Phi I_0 \frac{v}{v_0} + (C_h + C_r)$$

ou, si l'on passe aux efforts correspondants à la jante des roues F, en appelant F_0 l'effort produit par le courant I_0 et ajoutant comme force retardatrice le frottement de roulement P,

$$F = F_0 \frac{v}{v_0} + (F_h + F_r) + fP.$$

Si l'on substitue cette valeur dans l'équation différentielle du freinage donnée plus haut (p. 729), où i est la rampe et P le poids total,

$$dv = g\left(i - \frac{F}{P}\right)dt,$$

on obtient

$$\frac{1}{g}\frac{dv}{dt} + \frac{F_0}{P}\frac{v}{v_0} + \left(\frac{F_h + F_r + fP}{P} - i\right) = 0.$$

Si l'on pose pour abréger

$$\frac{F_0}{Pv_0} = m,$$

$$\frac{F_h + F_r + fP}{P} = n,$$

cette équation s'écrit

$$\frac{1}{g}\frac{dv}{dt} + mv + (n - i) = 0. \qquad (110)$$

ou, si l'on remarque que la vitesse et le temps sont liés au parcours x effectué depuis le commencement du freinage par la relation

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx}\frac{dx}{dt} = v\frac{dv}{dx},$$

$$\frac{1}{g} v \frac{dv}{dx} + mv + (n - i) = 0.$$

D'où

$$dx = \frac{n - i}{mg}\frac{dv}{mv + n - i} - \frac{dv}{mg},$$

dont l'intégrale est

$$x = \left(\frac{v_0 - v}{mg}\right) + \frac{i - n}{m^2 g} \log \text{nép} \left(\frac{mv_0 + n - i}{mv + n - i}\right)$$

La voiture s'arrête, pour $v = 0$, à une distance

$$X = \frac{v_0}{mg} + \frac{i - n}{m^2 g} \log \text{nép} \left(1 + \frac{mv_0}{n - i}\right)$$

ou, en remplaçant m par sa valeur,

$$X = \frac{PV_0^2}{F_0 g} \left[1 - (i - n) \left(\frac{P}{F_0}\right) \log \text{nép} \left(1 + \frac{F_0}{P(n - i)}\right)\right].$$

Le parcours d'arrêt X est donc encore ici proportionnel, toutes choses égales d'ailleurs, au carré de la vitesse initiale.

Pour qu'il y ait arrêt complet, il faut que $n > i$, c'est-à-dire que les frottements de toute espèce de la voiture et du moteur soient suffisants pour empêcher la voiture de se mettre en marche sur une pente i sous la seule action de son poids. Au-dessous de la pente limite $i = n$, la durée d'arrêt sera d'autant plus courte que la pente sera plus faible. Supposons-la égale à zéro, nous aurons le parcours minimum

$$X_{min} = \frac{Pv_0^2}{F_0 g} \left[1 - \frac{F_h + F_r + fP}{F_0} \log \text{nép} \left(1 + \frac{F_0}{F_h + F_r + fP}\right)\right].$$

La valeur maxima qu'on puisse donner à l'effort retardateur F_0 sans patinage est évidemment fournie par la relation

$$F_0 + F_h + F_r + fP = Pa,$$

en appelant a le coefficient d'adhérence. D'où

$$X_{min} = \frac{Pv_0^2}{F_0 g} \left[1 - \frac{F_h + F_r + fP}{F_0} \log \text{nép} \frac{aP}{F_h + F_r + fP}\right].$$

Le minimum possible est supérieur à

$$\frac{Pv_0^2}{F_0 g} \left[1 - \frac{f}{a - f} \log \text{nép.} \frac{a}{f}\right].$$

On voit ainsi, et cela était d'ailleurs évident, que ce frein doit toujours donner un parcours d'arrêt plus long que ceux qui produisent un effort retardateur F constant ; encore avons-nous négligé la réduction du flux I qui se produit à partir du moment où le courant devient très faible et où il n'y a plus saturation des inducteurs ; cette réduction fait qu'à partir d'un certain moment le terme en v de l'équation différentielle devrait être remplacé par un terme en v^2, ce qui augmente la durée de l'arrêt.

Le frein électrique ne produit donc pas théoriquement d'effets plus intenses qu'un bon frein mécanique. Mais pratiquement, il peut en réaliser de meilleurs lorsqu'on réduit progressivement pendant le ralentissement la résistance du rhéostat R intercalé dans le circuit des moteurs de façon à maintenir jusqu'au bout un courant aussi voisin que possible de celui qui produirait le patinage,

parce qu'on évite ainsi le calage qu'amènent presque inévitablement les autres procédés et qui réduit si notablement l'efficacité des freins.

La théorie que nous venons d'exposer s'applique avec quelques changements aux freins électromagnétiques. Si l'on suppose d'abord que les électros de ceux-ci travaillent au-dessous de la saturation, l'attraction magnétique et par suite l'effort retardateur F sont proportionnels au carré du courant [1] et, par suite, le terme en v de l'équation (110) devra être remplacé par un terme en v^2, c'est-à-dire qu'on aura la forme

$$\frac{1}{g} v \frac{dv}{dx} + bv^2 + (n - i) = 0,$$

en désignant par b une quantité qui est constante lorsque la résistance du circuit l'est elle-même et est alors égale à l'effort développé par le frein à la vitesse unité. L'intégration donne immédiatement

$$x = \frac{1}{bg} \text{ log nép } \frac{(bv_0^2 + n - i)}{bv^2 + n - i},$$

et, pour $v = 0$, le parcours total est

$$X = \frac{1}{bg} \text{ log nép } \left(1 + \frac{bv_0^2}{n - i}\right).$$

Il est forcément plus long encore que dans le cas précédent; l'emploi du frein électromagnétique serait donc peu avantageux si l'on devait l'employer dans ces conditions. Il existe heureusement un moyen facile d'améliorer ce fonctionnement : c'est de saturer le fer pour un faible courant; l'attraction reste alors à peu près la même pendant tout le temps du freinage.

On peut, dans tous les cas, imposer au mécanicien de diminuer progressivement la résistance; mais, pour éviter qu'il n'amène trop brusquement sa manette sur la position de résistance minima, on fera bien d'ajouter une résistance mécanique, telle qu'un piston à huile, qui ne lui permette pas de dépasser une certaine vitesse de manœuvre à partir du moment où il a fermé le moteur en court-circuit sur un rhéostat ou sur l'électro du frein magnétique.

On a proposé également une solution ingénieuse [2] pour maintenir automatiquement le courant à une valeur constante : elle consisterait à exciter l'électro-aimant non par du courant continu, mais par des courants alternatifs pris sur l'induit du moteur à l'aide de deux ou trois bagues; la self-

[1] En vertu de la formule bien connue de Maxwell, d'après laquelle la force qui s'exerce entre deux surfaces magnétiques au contact de section S et d'induction B est égale à

$$\frac{B^2S}{8\pi}$$

et B est proportionnel au courant si le fer est loin de la saturation.

[2] L. Baumgardt, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 28 mars 1895.

induction du circuit L étant très grande relativement à sa résistance R, le courant, qui est de la forme

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (2\pi pL)^2}},$$

en appelant p le nombre de périodes du courant, serait sensiblement égal à $\frac{E}{2\pi pL}$, et, comme la force électromotrice E est proportionnelle à la vitesse aussi bien que p, ce courant resterait sensiblement constant.

Cette solution n'a pas encore été appliquée ; elle n'a qu'un inconvénient, c'est qu'il faudrait ajouter des prises de courant et des bagues à tous les moteurs, ce qui en compliquerait la construction et prendrait une place gênante dans l'enveloppe.

BIBLIOGRAPHIE

TRAITÉS ET ARTICLES GÉNÉRAUX

ALDRIDGE (J. G. W.). — The present tendencies of electric tramway traction, *British Assoc.*, août 1897.

AN. — Electric traction for tramways, *El. Eng.*, N. Y., 10 avril 1896.

AN. — Street railway practice in America, *St. Ry. Journ.*, janvier 1896.

AUVERT. — Exposé de la question de la traction électrique, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, janvier 1895, 2e fasc. (voir la Discussion dans le *Bull.* d'octobre 1895).

BAST (de). — Pratique actuelle des installations de tramways électriques, *Bull. Ing. Instit. Montefiore*, 12 mars 1896.

BAYLOR (A. K.). — Some recent developments in electric traction appliances, *Journ. Inst. El. Eng.*, juin 1897.

BELL (L.). — Power distribution for electric railroads, New York, 1897.

CADIAT (E.). — Étude sur la traction électrique, *Portef. des Machines*, octobre, novembre et décembre 1895.

CLARK (D. Kinnear). — Tramways, their construction and working, London, Lockwood, 1894.

CROSBY (O. T.) and BELL (Louis). — The electric railway in theory and practice New York, Johnston, 1892.

DAWSON (Ph.). — Electric railways and tramways, their construction and operation, London, 1897.

DAWSON (Ph.). — Electric traction, *Engineering*. 1895 et 1896.

DAWSON (Ph.). — Mechanical features of electric traction, *El. Eng.*, Lond., 6 août 1897, et *El. Rev.*, Lond., 12 novembre 1897.

DIERMAN (W.). — Note sur le calcul des lignes aériennes de tramways électriques, *Bull. Ing. Instit. Montefiore*, 22 septembre 1894.

DUPUY (P.). — La traction électrique, Paris, Bécus, 1897.

EGGER (E.). — Elektrische Eisenbahnen, *Zeitschr. f. Elektrotechnik*, X et XI, 1894.

FAIRCHILD (C. B). — Street railways; their construction, operation and maintenance, New York, 1892.

FIELD (C. J.). — Electric railroad construction and operation, Proc. *Nation. El. Light Assoc.*, New York, septembre 1891.

FIELD (C. J.). — Present and prospective developments of electric tramways, *Trans. Amer. Soc. Mech. Eng.*, décembre 1894.

GÉRARD (Éric). — Leçons sur l'électricité professées à l'Institut Montefiore, Paris. Gauthier-Villars, 1893.

GÉRARD (Ernest). — Origines techniques de la traction électrique, *Bull. Soc. Belge Él.*, 1896.

GÉRARD (Ernest). — Traité d'électrotraction, Bruxelles, Weissenbruch, 1897.

GODFERNAUX (R.). — La traction mécanique des tramways, Paris, Baudry, 1898.

HAUPT (Herman). — Street railway motors, Philadelphia, Baird, 1893.

HEDGES (Killingworth). — American electric street railways, London, Spon, 1894.

HERING (Carl). — Recent progress in electric railways, New York, Johnston, 1892.

HOUSTON (E. J.) and KENNELLY (A. E.). — Electric street railways, New York, Johnston.

KAPP (G.). — Electric transmission of energy, London, 1892.

KAPP (G.). — Elektrische Bahnen, *Mitth. Verband deutsch. Elektrotechniker*, juin 1895.

KOSAK (G.). — Einrichtung und Betrieb der Elektromotoren für Industrie und für Strassenbahnen, Wien, Spielhagen u. Schurich, 1896.

KRIEG (Martin). — Die elektrischen Motoren und ihre Anwendungen in der Industrie und Gewerbe sowie in Eisen und Strassenbahnwesen, Leipzig, Leiner, 1891.

LEBLOND. — Les moteurs à courant continu, Paris, Berger-Levrault.

LUCE (Robert). — Electric railways, Boston, Harris, 1886.

MARCHENA (E. de). — La traction électrique des chemins de fer, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, août 1896.

MARCHENA (E. de). — La traction mécanique des tramways, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, juillet 1894. — Supplément, Paris, Bernard, 1895.

MARÉCHAL (H.). — Les tramways électriques, Paris, Baudry, 1897.

MARSHALL (Cloyd). — Electric traction, *El. World*, 25 décembre 1897.

MARTIN (T. C.) and WETZLER (J.). — The electric motor and its applications, New York, Johnston, 1887.

MARTINEZ (Giulio). — La trazione elettrica, Milano, Hœpli, 1894.

MERRILL (E. A.). — Tables and formulas for electric street railway engineers, New York, Johnston, 1894.

MULLER (F.). — Grundzüge des Kleinbahnwesens, Berlin, Ernst, 1895.

PALAZ (A.) et THURY (R.). — L'industrie électrique à l'Exposition de Chicago et aux États-Unis, Berne, 1894.

PELLISSIER (G.). — Chemins de fer et tramways électriques, *Éclair. Él.*, 1895-96-97.

PELLISSIER (G.). — Traction mécanique des tramways, *Éclair. Él.*, 16, 23 et 30 novembre, 7, 14, 21 et 28 décembre 1895.

PELLISSIER (G.). — Tramways électriques en Amérique, *Lum. Él.*, 21 et 28 juillet, 4 et 11 août 1894.

RATHENAU (E.). — Technische Skizzen aus den Vereinigten Staaten, *E. T. Z.*, février à mai 1896.

RECKENZAUN (A.). — Electric traction on railways and tramways, London, Biggs, 1892.

RICHARD (G.). — Chemins de fer et tramways électriques, *Lum. Él.*, 1889-90-91-92-93-94.

RUSCONI CLERICI (G.) e RADICE (E.). — La trazione elettrica sulle ferrovie e tramvie, Milano, Zanaboni e Gabuzzi, 1895.

SCHIEMANN (Max). — Bau and Betrieb elektrischer Bahnen, Leipzig, Leiner, 1895.

SPRAGUE (F. J.). — Coming developments of electric railways, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 1892.

TAINTURIER (C.). — La traction électrique, Paris, Fritsch, 1897.

TAVERNIER (H.). — Les tramways aux États-Unis, *Ann. des P. C.*, janvier et février 1896.

THOMPSON (Silvanus P.). — Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, Paris, Baudry, 1894.

TREVERT (E.). — Electric railway engineering, Lynn, Bubier, 1892.

VIOLA (R.). — La trazione elettrica e i suoi diversi sistemi, Palermo, Barravecchia, 1895.

VLOTEN (P. van). — Rapport sur la question de la traction électrique des tramways, *P.-V. Union Int. des Tramw.*, août 1894.

WALCKENAER (G.). — Traction électrique à prise de courant aérienne, Paris, Dunod, 1897.

WHIPPLE. — The electric railway, Detroit, 1890.

WILKINSON (H. D.). — Notes on electric tramways in the United States and Canada, *Journ. Inst. El. Eng.*, 22 novembre 1894.

OUVRAGES SPÉCIAUX

1° VOIE FERRÉE

ALLEN (C. Loomis). — General track construction, *Proc. New York State St. Ry. Assoc.*, 17 septembre 1895.

ALLEN (C. Loomis). — Rails for street railroads, *Proc. New York State St. Ry. Assoc.*, 8 septembre 1896.

AN. — Cast welding rail joints, *St. Ry. Rev.*, décembre 1894, *St. Ry. Journ.*, janvier et juin 1895.

AN. — Construction of street railway tracks in Minneapolis and St-Paul, *Eng. News*, 14 octobre 1897.

AN. — Continuous rails, *Electr.*, Lond., 18 decembre 1896.

AN. — Continuous rails in unpaved streets, *St. Ry. Rev.*, mai 1897.

AN. — Continuous track, *St. Ry. Rev.*, 15 mars 1895.

AN. — Electric welding in Brooklyn, *St. Ry. Journ.*, juillet 1894.

AN. — Rigid rail joints, *El. Ry. Gaz.*, 21 mars 1896.

ARNALL (F.). — Permanent way construction, *Proc. Tramw. Inst. of Great Britain and Ireland*, 1892.

BICKFORD (J. H.). — The practical side of the electric railway, *St. Ry. Journ.*, novembre 1891.

BOWEN (M. K.). — Street railway track and track joints, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, novembre 1896.

BROCA. — Voie métallique Broca, Paris, Tignol.

CHANCE (G. W.). — Constructing electric railways, *Western Electr.*, 5 juin 1897.

CHANCE (G. W.). — High carbon and special steels in rails, *Railroad Gaz.*, 27 août 1897.

EMERY. — Transition curves, *St. Ry. Journ.*, septembre 1895.

EYRE (Richard). — Electric welded continuous rail, *St. Ry. Journ.*, décembre 1896.

FISCHER-DICK. — Rapport sur la question des voies de tramways, *P.-V. Union Int. des Tramw.*, août 1894 et 1896.

FITCH (F. H.). — The wheel and the rail, *St. Ry. Journ.*, juillet 1894.

GREER (J. W.). — Track and overhead department economics, *St. Ry. Rev.*, janvier 1896.

GUILLAUME (C. E.). — Rails soudés, *Industr. Él.*, 10 février 1896.

HEUDE (H.). — Note sur le nouveau rail de tramway employé sur les voies du chemin de fer nogentais, *Ann. des P. C.*, 1er sem. 1890.

Hunt (W.) et Ast (W.). — Exposé de la question du renforcement des voies en vue de l'augmentation de la vitesse des trains, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de fer*, avril, mai et juin 1895 (voir la Discussion dans le *Bull.* de mars 1896).

McCarty (R. J.). — Electric street railway tracks, *St. Ry. Journ.*, février 1896.

McCulloch (Richard). — The continuous rail in street railway practice, *Journ. Assoc. Eng. Societies*, novembre 1895.

Mansfield (Geo. W.). — Rail sections and special construction, *St. Ry. Journ.*, octobre 1892.

Mead. — Cast-welded joint, *Wisconsin Eng.*, juillet 1897.

Meyer (J.). — Track and roadbed for electric lines, *St. Ry. Journ.*, octobre 1891.

Moxham (A. J.). — Experiments on the expansion of continuous rails, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1892.

Mussy. — Note sur les diverses qualités d'acier employées dans la fabrication des rails, *Ann. des P. C.*, 1er sem. 1890 et 2e sem. 1891.

Neilson (G. H.). — Construction and maintenance of electric railway tracks, *Proc. Pennsylvania State St. Ry. Assoc.*, 2 septembre 1896.

Pratt (Mason D.). — Street railway roadbed, *St. Ry. Journ.*, janvier à décembre 1896.

Raymond (Ward). — The problem of the continuous rail, *St. Ry. Journ.*, février 1897.

Seguela (R.). — Les tramways, voie et matériel, Paris, Gauthier-Villars et Masson, 1895.

2° Moteurs et équipements électriques

Brevets d'invention.

Catalogues et publications périodiques des constructeurs.

An. — Advance of the railway motor, *El. Ry. Gaz.*, 26 octobre 1895.

An. — Application des courants alternatifs monophasés aux tramways électriques, *Éclair. Él.*, 19 mai 1897.

An. — Bonta electric railway brake, *Amer. Electr.*, décembre 1896.

An. — Car wiring, *El. Eng.*, N. Y., 4 septembre 1895, *El. Journ.*, 15 novembre 1895.

An. — Car wiring for four motors, *St. Ry. Journ.*, octobre 1895.

An. — Care of street car motors, *St. Ry. Journ.*, février 1894.

An. — Commutator connections, *El. Ry. Gaz.*, 26 octobre 1895.

An. — Cost of motor maintenance, *St. Ry. Rev.*, mai à août 1896.

An. — Déri's elektromagnetische Wirbelstrom und Reibungsbremse, *E. T. Z.*, 22 juillet 1897.

An. — Deri's Wechselstrom-Gleichstrom System, *E. T. Z.*, 5 août et 2 septembre 1897, *Zeitschr. f. Elektrotechnik*, 15 juin 1897.

An. — Different methods of operating electric railway motors, *El. World*, 5 octobre 1895.

An. — Eickemeyer armature coils, *El. World*, 5 septembre 1896.

An. — Electric brake, *El. Ry. Gaz.*, 20 juillet 1895.

An. — Electric railway motor curves, *Amer. Electr.*, décembre 1896.

An. — Electric railway operation, *Amer. Electr.*, septembre 1897.

An. — Electric street car controller, *El. World*, 5 janvier 1895.

An. — Electrical machinery of the Walker Company, *El. World*, 17 octobre 1896.

An. — Embrayages à vitesse variable Worby-Beaumont, *Lum. Él.*, 4 novembre 1893

An. — Friction gear for electric railway motors, *St. Ry. Journ.*, septembre 1891.

An. — Fuses for street railway cars, *El. Ry. Gaz.*, 4 janvier 1896.

An. — Gear making and cutting, *St. Ry. Rev.*, décembre 1897.

AN. — Hydraulic gearing for electric cars, *El. Eng.*, N. Y., 7 et 28 août 1895.

AN. — Improvements in the electric railway motors, *El. World*, 20 février 1897.

AN. — Johnson-Lundell electric railway system, *El. World*, 12 mai 1894.

AN. — Julien regulating switch for storage battery cars, *El. World*, 21 juillet 1888.

AN. — Manufacture of armature coils in Schenectady, *St. Ry. Journ.*, septembre 1896.

AN. — Motor care and repair, *St. Ry. Rev.*, janvier 1897.

AN. — Motor repairs, *St. Ry. Journ.*, octobre et décembre 1894.

AN. — New type of car controller, *El. World*, 20 novembre 1897, *El. Rev.*, N. Y., 15 décembre 1897.

AN. — Pairing of electric railway motors, *Amer. Electr.*, février 1897.

AN. — Power absorbed by commutator brushes, *St. Ry. Journ.*, octobre 1895.

AN. — Railway motor commutator, *El. Ry. Gaz.*, 5 octobre 1895.

AN. — Recent types of generators and motors, *St. Ry. Journ.*, octobre 1897.

AN. — Recording wattmeters for street cars, *St. Ry. Rev.*, octobre 1897.

AN. — Regulation and governing of electromotors, *El. Rev.*, N. Y., 27 avril 1894.

AN. — Regulation of railway motors, *El. Ry. Gaz.*, 29 février 1896.

AN. — Repair of electric railway apparatus, *Amer. Electr.*, août 1896 et avril à juin 1897.

AN. — Series-parallel arrangement with single motor, *El. Eng.*, N. Y., 7 août 1895.

AN. — Short's device for braking electric cars, *St. Ry. Journ.*, juin 1892.

AN. — Shunt motors for railway work, *El. Eng.*, N. Y., 4 novembre 1896.

AN. — Sprague multiple unit system, *El. World*, 7 août 1897, *St. Ry. Journ.*, août et septembre 1897, *St. Ry. Rev.*, décembre 1897.

AN. — Street railway self-starting single-phase motor, *El. World*, 25 juillet 1896.

AN. — Synchronizing railway motors, *El. Eng.*, N. Y., 4 septembre 1895.

AN. — Testing armature coils, *St. Ry. Rev.*, décembre 1897.

AN. — Testing motors at Schenectady, *St. Ry. Rev.*, mai 1897.

AN. — Tests on Short gearless motors, *St. Ry. Journ. Souv.*, octobre 1891.

AN. — The three types of Short railway motors, *St. Ry. Journ.*, octobre 1891.

AN. — Traction motor regulation, *El. Eng.*, N. Y., 18 septembre 1895.

AN. — Truck and motor repairs, *St. Ry. Journ.*, février 1896.

ANTHONY. — Street car propulsion, *El. Journ.*, Chicago, 15 août 1895.

ARMAGNAT. — Appareils de mesures électriques, Paris, Carré et Naud, 1897.

ARNO (R.). — Elektrische Strassenbahnen mit Einphasen Wechselstrom, *E. T. Z.*, 21 janvier 1897.

ASHLEY. — Electric brake, *El. Power*, janvier 1896.

BARNES (D. L.). — Speed, power and efficiency of electric motors for locomotives, *Western Electr.*, 29 août 1896.

BAUCH (R.). — Nebenschlussmotoren für Bahnbetrieb, *E. T. Z.*, 27 mai 1897.

BAUMGARDT (L.). — Nutzbremsung elektrischer Wagen, *E. T. Z.*, 6 septembre 1894 et 28 mars 1895.

BAXTER (Wm.), Jr. — Adoption of an universal standard for rating railway apparatus, *El. World*, 21 novembre 1896.

BAXTER (Wm.), Jr. — Controlling the speed of car motors, *El. Ry. Gaz.*, 25 avril 1896, *El. World*, 10, 17 et 24 avril 1897.

BAXTER (Wm.), Jr. — Efficiency of railway motors, *El. World*, 26 septembre et 7 novembre 1896.

BAXTER (Wm.), Jr. — New system of electric propulsion, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, juin 1892.

BAXTER (Wm.), Jr. — Series-parallel controller for four-motor equipments, *El. World*, 18 juillet 1896.

BAXTER (Wm.), Jr. — Shunt motors for railway work, *El. World*, 12 décembre 1896.

BEHREND (B. A.). — Asynchrone Wechselstrommotoren, *E. T. Z.*, 25 mars 1897.

BELL (L.). — Practical properties of polyphase apparatus, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 17 janvier 1894.

BLONDEL (A.). — Moteurs synchrones, Paris, Lahure, 1895.

BLONDEL (A.). — Note sur le courant déwatté, *Congrès Int. d'Électr.*, Genève, août 1896.

BLONDEL (A.). — Propriétés générales des champs magnétiques tournants, *Éclair. Él.*, mai 1895.

BLONDEL (A.). — Rôle des fuites magnétiques dans les moteurs à champs tournants, *Éclair. Él.*, octobre à décembre 1896.

BLONDEL (A.). — Théorie graphique des moteurs polyphasés, *Industr. Él.*, 25 février 1896.

CAHOON (J. B.). — Daily inspection and care of car equipments, *Proc. New York State St. Ry. Assoc.*, 8 septembre 1896.

CARTER (Wm. H.). — Education of motormen, *St. Ry. Journ.*, juillet 1895.

CHILD (Ch. T.). — Evolution of the street railway motor, *Amer. Electr.*, octobre 1896.

CLEVELAND. — Effects of low voltage on motor circuits, *Amer. Electr.*, juillet 1897.

COLIN (L. V.). — Applications de la transformation de l'énergie électrique en chaleur, *Bull. Soc. Int. des Él.*, février 1897.

CRAVATH (J. R.). — Economy in controller handling, *St. Ry. Rev.*, avril et août 1897. *El. Rev.*, N. Y., 13 octobre 1897.

CROSBY (O. T.) and BELL (L.). — Dynamometer tests upon Sprague motors, *El. World*, 31 mai 1890.

DALLAS. — American electrical tramway gearing, *Electr.*, Lond., 12 avril 1895.

DARRIEUS (G.). — Emploi combiné des accumulateurs et des moteurs électriques, *Électr.*, 11 et 18 août 1894.

DAWSON (Ph.). — Tests of Reckenzaun tramway motors and gearing, *El. Rev.*, Lond., 18 mai 1894.

EGGER (E.). — Nebenschlussmotoren für elektrischen Strassenbahnbetrieb, *E. T. Z.*, 24 juin 1897.

ENGELHARDT (O.). — Nebenschlussmotoren, *E. T. Z.*, 20 mai 1897.

EVERETT (H. A.). — The perfect electric motor, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, mai 1891.

FERRARIS e ARNO. — Nuovo metodo per la trazione elettrica per mezzo di correnti alternativi, Torino, 1896.

FISCHER-HINNEN (J.). — Die Wirkungsweise, Berechnung und Construktion elektrischer Gleichstrom Maschinen, Zürich, Raustein, 1897.

FISCHER-HINNEN (J.). — Solution graphique de quelques problèmes pratiques relatifs aux dynamos à courant continu, *Éclair. Él.*, septembre 1894.

FISCHINGER (E. G.). — Regulirung elektrischer Motorwagen, *E. T. Z.*, 2 avril 1896.

FISCHINGER (E. G.). — Wirkungsgrad von Strassenbahnmotoren unter Berücksichtigung ihrer Zahnradübersetzung, *E. T. Z.*, 23 décembre 1897.

FODOR (E. de). — Die elektrischen Motoren mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Strassenbahnen, Wien, Hartleben, 1890.

FOSTER (S. L.). — Running notches of series-parallel controllers, *St. Ry. Journ.*, septembre 1896.

GÉRARD (Éric). — Mesures électriques, Paris, Gauthier-Villars, 1896.

GÉRARD (Ernest). — Note sur l'emploi des moteurs gearless pour la traction électrique, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, juin 1895, 2ᵉ fasc.

GIRAULT (P.). — Matériel de traction électrique de la Compagnie de Fives-Lille, *Éclair. Él.*, 28 novembre 1896.

GUILBERT (F.). — Procédé Siemens et Halske pour le couplage des moteurs asynchrones, *Lum. Él.*, 6 janvier 1894.

HAMPTON (G. P.). — Application of electric motors to street cars, *St. Ry. Journ.*, mai 1891.

HANCHETT (G. T.). — Management of railway power stations, the car equipment, *El., World*, 1 et 8 décembre 1894.

HANCHETT (G. T.). — Practical hints for motormen, *El. Ry. Gaz.*, juin et juillet 1895.

HANCHETT (G. T.). — Testing railway motors, *El. Ry. Gaz.,* 14 mars 1896.

HARRINGTON (W. E.). — Circuit breakers vs. fuses, *El. Ry. Gaz.*, 29 février et 7 mars 1896.

HARRINGTON (W. E.). — Destructive arcing of 500 volts fuses, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1894.

HARRINGTON (W. E.). — Emergency brake, *El. Eng.*, N. Y., 13 novembre 1895.

HARRINGTON (W. E.). — Fuse shunts for magnetic circuit breakers, *El. Eng.*, N. Y., 4 mars 1896.

HARRINGTON (W. E.). — Street car magnetic cut-outs, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1893.

HASKINS (Caryl D.). — Recording wattmeter in railway practice, *St. Ry. Journ.*, mai 1896.

HENRY (J. C.). — Electric railroads, *St. Ry. Journ.*, avril 1893.

HENRY (J. C.). — Railway motors, *El. Eng.*, N. Y., 20 février 1895.

HOBART (James F.). — Motor repairs, *St. Ry. Journ.*, novembre et décembre 1894, janvier 1896.

HOOPES (M.). — Use of multiphase current transmission for ordinary street railways, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1897.

HOUSTON (E. J.) and KENNELLY (A. E.). — Alternating currents for railways, *El. Ry. Gaz*, 21 mars 1896.

HUTCHINSON. — Tests of railway motors, *El. Eng.*, N. Y., 1893.

HUTCHINSON (F. L.) and PHILLIPS (L. A.). — Westinghouse electric street car equipments, Pittsburg, 1896.

KAPP (G.). — Elektromechanische Konstruktionen, Berlin, Springer, 1898.

KOLBEN (E.). — Schneckengetriebe in Verbindung mit Elektromotoren, *E. T. Z.*, 15 août 1895.

KOLBEN (E.). — Strassenbahnmotoren, *E. T. Z.*, 19 août 1892.

LAFFARGUE (J.). — Système de traction électrique de l'Allgemeine Elektricitâts-Gesellschaft, *Industr. Él.*, 10 janvier 1895.

LEONARD (H. Ward). — How we shall operate an electric railway extending 100 miles from the power station, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 21 février 1894.

LEONARD (H. Ward). — Motor operating automatically at any desired speed or torque and with maximum efficiency under all conditions, *St. Ry. Journ.*, janvier 1892.

LEONARD (H. Ward). — Speed regulation of electric motors, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 18 novembre 1896.

LUXENBERG. — Nebenschlussmotoren für elektrischen Strassenbahnbetrieb, *E. T. Z.*, 6 mai 1897.

MÉLOTTE. — Essais des moteurs électriques, *Bull. Ing. Instit. Montefiore*, février 1893.

MONROE. — Suggestions for electric railway practice, *Amer. Electr.*, août 1897.

NISSLEY (L.). — The perfection of the electric railway motor, *St. Ry. Journ.*, octobre 1894.

PARHAM. — Electric railway practice, *Amer. Electr.*, décembre 1897.

PARSHALL (H. F.). — Development of electrical traction apparatus, *El. Rev.*, Lond., 28 février 1896.

PARSHALL (H. F.). — Methods of electrically controlling street car motors, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 19 avril 1892, *El. World*, 14 mai 1892.

PERRY (Nelson W.) — Electric railway motors, New York, Johnston.

PERRY (Nelson W.). — Series traction system, *Electr.*, Lond., 4 décembre 1894.

Picou. — Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, Paris, Baudry, 1890.

Pope (Franklin L.). — Inventions of Thomas Davenport, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 24 février 1891.

Porter (Frank B.). — Methods of testing street railway motors, *St. Ry. Journ.*, juillet à décembre 1897, *St. Ry. Rev.*, octobre 1897.

Potier. — Moteurs asynchrones, *C.-R. de l'Acad. des Sciences*, 1897.

Reckenzaun (A.). — Electric street cars, with special reference to methods of gearing, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 20 septembre 1887.

Reid (Thorburn). — Causes and effects of sparking on commutators, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 1897.

Rey (J.). — Mesure du rendement industriel d'un moteur de 720 chev., *Bull. Soc. Int. des Él.*, juin 1894.

Robinson (A.). — Gearing for electric railway motors, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, septembre 1888.

Sachs (J.). — Is the fuse or the circuit breaker best suited for motor protection, *El. World*, 25 septembre 1897.

Sever (G. F.). — Comparative value of the rheostat and series-parallel method of car control, *El. Power*, mai 1895.

Shepard (W. E.). — Motor repairs, *St. Ry. Journ.*, février à juin 1895.

Shepard (W. E.). — Repairs of electric railway apparatus, *Amer. Electr.*, mai à novembre 1896.

Short (S. H.). — Gearless motors, *St. Ry. Journ.*, mai 1892.

Short (S. H.). — Non arcing controllers, *El. Eng.*, N. Y., 18 décembre 1895.

Smith (Nelson). — Electric braking for motor cars, *St. Ry. Gaz.*, 22 et 29 décembre 1894.

Smith (W. C.). — Care of commutators, *St. Ry. Rev.*, mai 1897.

Sperry (E. A.). — Electric brakes, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 19 septembre 1894, *El. World*, 29 septembre 1894.

Sperry (E. A.). — Single motors for cars, *St. Ry. Journ.*, avril 1892.

Stodola. — Schneckenbetrieb für Motoren, *Schweiz. Bauzeit.*, 28 juillet 1895.

Tischendörfer (F.). — Bayerische Landesausstellung in Nürnberg, Anlagen der Firma Elektricitäts Actien-Gesellschaft vorm. Schuckert und Co., *E. T. Z.*, 13 août 1896.

Uebelacker (Ch. F.). — Car equipment tests, *St. Ry. Journ.*, avril 1893.

Uebelacker (Ch. F.). — Study of the causes which lead to the breakage of gears and pinions, *St. Ry. Journ.*, avril et mai 1896.

Wheeler (Geo. K.). — Single reduction motor, *St. Ry. Journ.*, mai 1892.

Wiener. — Railway motor design, *Amer. Electr.*, octobre 1897.

Zander (E.). — Serien-Zusatzmaschinen für den Betrieb elektrischer Bahnen, *E. T. Z.*, 27 août 1896.

3° Matériel roulant électrique

Brevets d'invention.

Catalogues et publications périodiques des constructeurs.

Akarman (J. N.). — Street railway trucks, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1896.

An. — Akkumulatorenbetrieb auf Vollbahnen, *E. T. Z.*, 22 juillet 1697.

An. — Baldwin-Westinghouse electric locomotives, *El. Eng.*, N. Y., 26 février 1896, *El. World.*, 22 février et 7 mars 1896.

An. — Baldwin-Westinghouse mining locomotives, *Eng. and Min. Journ.*, 29 février et 4 juillet 1896.

An. — Boynton bicycle railroad, *El. Rev.*, Lond., août 1894.

AN. — Changeable electric headlights, *St. Ry. Journ.*, avril 1897.

AN. — Daft elevated railway motor « Ben Franklin », *El. World*, 1er décembre 1888, 16 février et 23 mars 1889.

AN. — Economy of car heaters, *Western Electr.*, 26 décembre 1896.

AN. — Efficiency of car fenders, *Eng. News*, 14 novembre 1895.

AN. — Electric car brake, *St. Ry. Rev.*, octobre 1895.

AN. — Electric equipment of Brooklyn bridge cars, *St. Ry. Journ.*, octobre 1896.

AN. — Electric freight locomotive, *St. Ry. Journ.*, décembre 1891.

AN. — Electric haulage, *El. World.*, 15 décembre 1894.

AN. — Electric heaters of to-day, *St. Ry. Journ.*, septembre 1896.

AN. — Electric locomotive, *El. Eng.*, Lond., 18 mai 1894.

AN. — Electric locomotive, *El. Rev.*, Lond., 17 septembre 1897.

AN. — Electric locomotive, *Journ. of Electr.*, septembre 1895.

AN. — Electric locomotive in New Haven, *St. Ry. Journ.*, janvier 1897.

AN. — Electric locomotives of the Baltimore and Ohio railroad, *St. Ry. Journ.*, juillet 1895.

AN. — Electric mail cars, *St. Ry. Journ.*, juillet 1895.

AN. — Electric switching locomotive, *El. Word.*, 9 janvier 1897.

AN. — Electric traction on the Third Avenue « L » Road, New York, *El. World*, 10 octobre 1896.

AN. — Elektrische Schnellzuglokomotive der General Electric Company, *E. T. Z.*, 25 août 1893.

AN. — Elektrische Vollbahnlokomotive, *E. T. Z.*, 7 ootobre 1897.

AN. — Fender report in Baltimore, *St. Ry. Journ.*, octobre 1894.

AN. — Fenders, *St. Ry. Gaz.*, 13 avril 1895.

AN. — Hauling freight with electric cars, *El. Ry. Gaz.*, 14 septembre 1895.

AN. — Heating cars by electricity, *St. Ry. Journ.*, juillet 1891.

AN. — Heilmann locomotive, *El. Rev.*, Lond., 30 octobre 1896.

AN. — Immisch electric locomotive for mines, *El. World*, 16 mars 1889.

AN. — Interurban car, *El. Eng.* et *El. Rev.*, N. Y., 14 avril 1897.

AN. — Jeffrey mining locomotives, *Eng. and Min. Journ.*, 23 mai 1896, *El. World*, 20 septembre 1890 et 24 août 1895.

AN. — Lake Street Elevated motor cars, *St. Ry. Rev.*, avril 1896.

AN. — Locomotivbetrieb mit Sammlerbatterie auf der New-Yorker Hochbahn, *Elektrotechn. Anzeiger*, 1896, n° 31.

AN. — Locomotive à accumulateurs, *Portef. des Machines*, septembre 1892.

AN. — Locomotives for the Jungfrau railway, *El. Eng.*, London, 27 août 1897.

AN. — Meneely tubular bearing, *Engineering*, 29 mars 1895.

AN. — Mining locomotive, *Eng. and Min. Journ.*, 16 janvier 1897.

AN. — Mining locomotive of the Western Electric Co., *Eng. and Min. Journ.*, 12 janvier 1895.

AN. — Master car builders tests of brake shoes, *Eng. News*, 20 juin 1895.

AN. — Narrow gauge electric locomotive, *El. Eng.*, Lond., 20 septembre 1895.

AN. — Note sur la locomotive électrique d'essai de la Compagnie du chemin de fer du Nord, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, juin 1895, 2e fasc.

AN. — Note sur la locomotive électrique système Heilmann, la « Fusée », *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, juin 1895, 2e fasc.

AN. — Overcrowding of electric cars, *El. World*, 11 et 18 juillet, 12 septembre 1896.

AN. — Patton motor car, *Railway and Eng. Rev.*, novembre 1897.

AN. — Present status of electric heaters, *St. Ry. Journ.*, septembre 1897.

AN. — Relative cost of car repairs, *St. Ry. Journ.*, septembre 1895.

AN. — Roller bearings, *St. Ry. Journ.*, janvier et février 1897, *El. Rev.*, N. Y., 4 juin 1897.

AN. — Self loading trolley car for street cleaning, *Scientific Amer.*, 26 septembre 1896.

AN. — Sprague electric locomotive, *El. Eng.*, N. Y., 18 octobre 1893.

AN. — Street car fenders, *Eng. News*, 3 janvier 1895.

AN. — Street railway cars in the United States, *St. Ry. Journ*, octobre 1896.

AN. — Swivel trucks in electric railway service, *St. Ry. Journ.*, juillet 1897.

AN. — Thirty ton electric locomotive, *St. Ry. Journ.*, juillet 1893.

AN. — Thofehrn mining locomotives, *Eng. and Min. Journ.*, 16 janvier 1896.

AN. — Tramway électrique Hutin et Leblanc, *Éclair. Él.*, 16 novembre 1895.

AN. — Vacuum pump for elevated railway service, *St. Ry. Journ.*, septembre 1896.

AN. — Vestibules, *St. Ry. Rev.*, décembre 1896.

AN. — Voiture et locomotive électriques Raffard, *Lum Él.*, décembre 1890, *Gén. Civ.*, 16 novembre 1895.

AN. — Walkins electric locomotive, *Eng. News*, 12 mars 1896.

BARNES (D L.) — Electric locomotives, Philadelphia, Lippincott, 1896.

BAYLOR (A. K.) — Power brakes upon electric cars, *St. Ry. Journ.*, mars 1896.

BONNEAU (H.) et DESROZIERS (E.). — Étude sur la traction électrique des trains de chemin de fer, Paris, Baudry, 1892.

BOYNTON (E. C.). — Power brakes for electric motor cars, *El. World*, 2 juin 1894.

BRILL (J. A.). — Double truck vs. single truck cars, *St. Ry. Journ.*, janvier 1895.

BRILL (J. A.). — Trucks, *St. Ry. Journ.*, février 1893.

CAHOON (J. B.). — Street railway repairs, *El. World*, 20 octobre 1894.

CARUS-WILSON. — Roller bearings for railways, *Electr.*, Lond., 13 novembre 1896.

CRAWFORD (R. A.). — Requirements of safety appliances for street railways, *St. Ry. Journ.*, janvier 1894.

DAFT (Leo). — Early electric motors on the New York Elevated Railway, *El. World*, 3 avril 1897.

DAMON. — Car heating, *El. Eng.*, N. Y., 11 novembre 1897.

DROUIN (F.). — Les locomotives électriques, système J.-J. Heilmann, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, juin 1896.

DUNCAN (Louis). — Baltimore tunnel locomotives, *El. Rev.*, N. Y., 29 avril 1896.

DUNNING (Robert). — Construction and maintenance of car bodies and trucks, *Proc. New York State St. Ry. Assoc.*, septembre 1897.

EVANS (Powell). — Brake shoes, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1894.

FAIRCHILD (C. B.). — Studies in economic practice, *St. Ry. Journ.*, mai à septembre 1896.

FITZGERALD. — Electric automotors, *El. Rev.*, N. Y., 11 décembre 1896.

FOSTER (S. L.). — Electric cars, car houses and car repairs in San Francisco, *St. Ry. Journ.*, septembre 1897.

FOWLER (L.). — Trucks for electric cars, *St. Ry. Journ.*, novembre 1891.

GEORGE (J. C.). — Trucks, *St. Ry. Journ.*, juin 1894.

GRIÈGES (de) fils. — Nouvelles locomotives Heilmann, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, février 1896.

GRIFFIN (P. H.). — Comparison of american and european wheel practice, *St. Ry. Journ.*, avril 1897.

GRIFFIN (P. H.). — Development of the modern electric railway car wheel, *St. Ry. Journ.*, janvier 1897.

GRIFFIN (P. H.). — Manufacture of the modern electric car wheel, *St. Ry. Journ.*, mars 1895.

Grille. — Les chemins de fer à l'Exposition de Chicago, matériel roulant et tramways, *Revue Technique de l'Exposition de Chicago en* 1893, Paris, Bernard, 1896.

Hamelink. — Rapport sur la question du chauffage des voitures de tramways, *P.-V. Union Int. des Tramw.*, août 1894.

Heilmann (J. J.) — Le chemin de fer électrique système J.-J. Heilmann, *Bull. Soc. Industr. de Mulhouse*, janvier 1893.

Henry (J. C.). — Electric traction under steam railway conditions, *El. Eng.*, N. Y., 6 janvier 1897, *St. Ry. Journ.*, janvier 1897.

Hippe. — Rapport sur la question des appareils protecteurs, *P.-V. Union Int. des Tramw.*, août 1896.

Hospitalier (E.). — Nouvelle locomotive électrique J.-J. Heilmann, *Industr. Él.*, 25 novembre et 10 décembre 1897.

Hutchinson (C. T.). — Electric locomotive, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, mars 1895.

Jacquin (Ch.). — Locomotive Heilmann, *Lum. Él.*, 24 février et 10 mars 1894.

Jacquin (Ch.). — Nouvelles locomotives électriques Heilmann, *Industr. Él.*, 25 janvier 1894.

Leonard (H. Ward). — Efficiency of the Heilmann locomotive, *El. Rev.*, N. Y., 12 mai 1897.

Leonard (H. Ward). — Heilmann locomotive, *Electr.*, Lond., 15 mars 1895.

McCulloch (Richard). — Street railway cars in Saint-Louis, *St. Ry. Journ.*, octobre 1896.

McElroy (J. F.). — Car heating, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1895.

McElroy (J. F.). — How shall we heat our cars, *Proc. New York State St. Ry. Assoc.*, 17 septembre 1895.

McGhie. — Development of the electric locomotive, *El. Power*, novembre 1895.

Marnier (A.). — Chemin de fer électrique système J.-J. Heilmann, *Rev. Industr.*, 11 mars 1893.

Marnier (A.). — Voiture automobile de la Compagnie générale des Omnibus, *Rev. Industr.*, 2 décembre 1893.

Marshall (Bayley). — Roller bearings, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 27 mai 1897, et *British Assoc.*, Toronto, 1897.

Mullin. — Switching locomotive, *Cassier's Magazine*, février 1897.

O'Mahoney. — Trolley car repairs, *El. Eng.*, N. Y., 2 juin 1897.

Parker (Lee H.). — Experience with the electric locomotive at Baltimore, *St. Ry. Journ.*, mars 1896.

Partridge (W. E.). — Street railway rolling stock, *St. Ry. Journ.*, septembre à décembre 1895, février à août 1896.

Partridge (W. E.). — Wheel metal, *St. Ry. Journ.*, février 1895.

Purdon. — Roller bearings for railways, *El. Eng.*, Lond., 13 juillet 1894.

Reynier (E.). — La traction électrique par accumulateurs, Paris, Michelet, 1883.

Reynolds. — Motormen and car repairs, *St. Ry. Rev.*, mars 1895.

Robinson (Wm.). — Electric car trucks, *St. Ry. Journ.*, juillet 1895.

Russell (F. D.). — Street car wheels, *Proc. New York State St. Ry. Assoc.*, septembre 1897.

Short (S. H.). — Interurban electric railway, *El. Eng.*, N. Y., 29 mai 1895, *St. Ry. Journ.*, juin 1895.

Siemens (Alexander). — Electric locomotives, *British Assoc.*, août 1892.

Sperry (E. A.). — Traction and street railway trucks, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1893.

Swann. — Electric locomotives, *Sibley Journ.*, mai 1897.

Tromieu (B.). — Voitures automobiles dans les chemins de fer, *Éclair. Él.*, 6 novembre 1897.

Uebelacker (Ch. F.). — Brake rigging for electric cars, *St. Ry. Journ.*, mars 1897.

UEBELACKER (Ch. F.). — Effect of service on street car bodies, *St. Ry. Journ.*, septembre et octobre 1895.

VARNEY. — Electric locomotives, *St. Ry. Gaz.*, 1895.

VLECK (F. van). — Track brakes, *St. Ry. Journ.*, avril 1892.

WESSELS (E. J.). — Air-brakes, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1895.

WOODS (E. H.). — Electric locomotive, *Engineering*, 19 août 1892.

WORTHINGTON (E.). — Electric locomotives, *Manchester Assoc. of Engineers*, 23 novembre 1895.

4° TRACTION

AN. — Ascending grades by electric force, *St. Ry. Journ.*, juin 1896.

AN. — Baltimore and Ohio locomotive tests, *St. Ry. Rev.*, mars 1896, *El. Eng.* et *El Rev.*, N. Y., 6 novembre 1896.

AN. — Comparative fuel consumption on electric and steam railways, *Eng. News*, 10 janvier 1895.

AN. — Coupled wheels on cars, *Electr.*, Lond., 21 décembre 1894.

AN. — Difficulties of electric railroading, *Amer. Eng.*, 12 décembre 1895.

AN. — Electric traction on railroads, *Electr.*, Lond., 13 novembre 1896.

AN. — Engineering side of the application of electricity to standard railroading, *Proc. New York Railroad Club*, octobre 1897.

AN. — Expériences de traction électrique à Budapest, *Lum. Él.*, 4 mars 1893.

AN. — Heavy electric railroading, *St. Ry. Journ.*, juillet 1897.

AN. — High speed train resistance, *El. World*, 9 juillet 1892.

AN. — Mechanical efficiency of electric traction, *El. Ry. Gaz.*, 30 novembre 1895.

AN. — Motive power for traction, *Western Electr.*, 20 novembre 1897.

AN. — Power consumption of electric railway cars, *Journ. of Electr.*, août 1897.

AN. — Power required to haul suburban passenger trains, *El. World*, 18 juin 1892.

AN. — Railway motor testing in Schenectady, *St. Ry. Journ.*, avril 1897.

AN. — Rapid transit in large cities, *Amer. Electr.*, avril 1895.

AN. — Recent tests of acceleration and braking, *Eng. News*, 14 octobre 1897.

AN. — Starting cars, *St. Ry. Rev.*, 15 août 1895.

AN. — The battle of the motive powers, *St. Ry. Journ.*, octobre 1897.

AN. — Track indicator car of the Chicago City Railway Company, *St. Ry. Journ.*, mai et juin 1897, *St. Ry. Rev.*, décembre 1896 et janvier 1897, *Eng. News*, 14 octobre 1897.

AN. — Traction électrique à grande vitesse, *Industr. Él.*, 25 juillet 1896.

AN. — Train acceleration, *Eng. News*, 9 décembre 1897.

AN. — Trolley system applied to steam roads, *El. Eng.*, N. Y., 13 et 20 février, 20 mars 1895.

ASPINALL (J. A. F.). — Exposé de la question des locomotives des trains à grande vitesse, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, juin 1895, 2° fasc.

ASPINALL (J. A. F.). — Steam versus electric traction, *El. Eng.*, Lond., 12 novembre 1897.

BARBIER. — Résistance à la traction des trains de voyageurs à grande vitesse, *Rev. Gén. des Ch. de Fer*, avril 1897.

BARNES (D. L.). — Present utility of electric motors on railroads, *Railroad Gaz.*, 4 mai 1894.

BARNES (D. L.). — Rapid transit investigation, *El. Ry. Gaz.*, 15 février 1896.

BAXTER (Wm.), Jr. — Can electricity supplant the steam locomotive on trunk railways, *El. Eng.*, N. Y., février et mars 1896.

BAXTER (Wm.), Jr. — Electric motors vs. steam locomotive, *El. Eng.*, N. Y., 20 mars 1895.

BAXTER (Wm.), Jr. — Motor cars vs. electric locomotives, *El. World*, 31 juillet 1897.

BAYLOR (A. K.). — Power consumption on electric railways, *Proc. Pennsylvania State St. Ry. Assoc.*, 4 septembre 1895.

BEDELL (F.). — Electric railway tests, *Sibley Journ.*, 1891.

BELL (Louis). — Problems in electric traction, *El. World*, 22 juin 1889.

BIRK (A.). — Anwendung der elektrischen Zugförderung auf Hauptbahnen, *Oesterr. Eisenbahn-Zeitung*, 17 septembre 1893.

BLANCHON. — Accumulateurs à charge rapide, *Bull. Soc. Int. des Él.*, mars 1897.

BOUSQUET (du). — Discours inaugural (vitesse sur les chemins de fer), *Bull. Soc. Ing. Civ.*, 5 janvier 1894.

BRANGS (P. H.). — Application of electricity to steam railroad, *Proc. Amer. Ry. Master Mechanics Assoc.*, 4 septembre 1895.

BÜTTNER (M.). — Strassenbahnbetrieb mit Akkumulatoren, *E. T. Z*, 28 juin 1893.

CARTER (E. T.). — Electric traction, *Electr.*, Lond., 20 mai 1892.

CHAPMAN. — Current consumption of motor cars under various potentials, *St. Ry. Rev.*, février 1897.

COCHRANE (H.) and SWARTOUT (E. J.). — Requirements of high speed and heavy electric traction, *El. World*, 1er mai 1897.

COLLES (G. W.) and GALLAHER (E. B.). — Test of a new design of electric railway power station, *Eng. News*, 7 mars 1895.

CORSEPIUS (Max). — Grundlage für die Berechnung und den Bau von elektrischen Bahnen, Stuttgart, Enke, 1896.

COUCHE (C.). — Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer, Paris, Dunod, 1867-1871.

CRAVATH (J. R.). — Electric railway work, *El. Rev.*, N. Y., 8 janvier 1896,

CROSBY (O. T.). — Does current between wheel and rail increase traction, *St. Ry. Journ.*, mai 1890.

CROSBY (O. T.). — Experimental study of atmospheric resistance, *Engineering*, 30 mai, 6 et 13 juin 1890.

CROSBY (O. T.). — Practical points in electric railway work, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 24 février 1891.

CROSBY (O. T.). — Problems of electric railway work, *El. Eng.*, N. Y., 17 juillet 1895.

CURTISS (H. P.) and POND (H. O.). — Car and line tests, *Sibley Journ.*, mai 1896, *St. Ry. Rev.*, juillet 1896.

DAFT (Leo). — Electrical work on the elevated roads, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 25 juin 1889.

DARLINGTON. — Long distance and heavy duty electric railways, *El. Eng.*, N. Y., 9 septembre 1896.

DASHIELL (B. J.). — Electric traction on trunk lines, *Trans. Amer. Soc. Mech. Eng.*, 1894.

DAVIS. — Electric traction under steam railway conditions, *Eng. Mag.*, mai et juin 1897.

DAVIS and WILLIAMSON. — Possibilities of rapid electric travel, *Engineering Mag.*, octobre et novembre 1897.

DEHARME (E.) et PULIN (A.). — Chemins de fer : matériel roulant, résistance des trains, traction, Paris, Gauthier-Villars, 1895.

DELAHAYE (Ph.). — Emploi de l'électricité pour la traction des trains de chemins de fer, *Rev. Industr.*, 17 janvier 1893.

DENIZET (F.). — Limite de déclivité à adopter pour les tramways urbains à adhérence, *Ann. des P.C.*, 2e sem. 1895.

Desdouits. — Expériences exécutées sur les chemins de fer de l'État, *Rev. Gén. des Ch. de Fer*, mai 1890.

Duncan (Louis). — Future of electricity in railroad work, *Journ. Franklin Instit.*, juin 1896.

Duncan (Louis). — Substitution of electricity for steam in railway practice, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, juin 1895.

Du Riche Preller (C. S.). — Electrical steep-grade traction in Europe, *Proc. Inst. El. Eng.*, vol. XXIII, 22 novembre 1894.

Egger (E.). — Ermittelung von Werthen für Tractions-Coëfficienten bei elektrischen Strassenbahnen, *Zeitschr. f. Elektrotechnik*, 15 mars 1896.

Emery (Ch. E.). — Electric traction under steam railway conditions, *Trans. Amer. Inst. El. Eng*, octobre 1896.

Epstein (L.). — Accumulators for rapid charging, *El. Rev.*, Lond., 16 avril 1897.

Forbes. — Application of electric power on trunk line railways, *Engineering Mag.*, octobre 1897.

Foster (S. L.). — Ascending grades by electric force, *St. Ry Journ.*, juin 1896. *Eng. News*, 9 juillet 1896.

Gadot (P.). — Traction électrique et traction animale des tramways, *Revue technique de l'Exposition de* 1889, octobre 1890.

Galton (Douglas). — Railway brakes, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, juin et octobre 1878. *British Assoc.*, Dublin, 1878.

Gérard (Ernest). — Note à propos d'un essai de traction électrique sur un railway. *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, janvier 1891.

Ghenet (G.) et Boy de la Tour (H.). — Calcul du poids d'accumulateurs, *Industr. Él.*, 25 juin 1895.

Hale (Irving). — Electric railway power tests, *El. World*, 17 mai 1890.

Hall (W. E.). — Electric traction on railroads, *Telegraphic Journ. and El. Rev.*, N. Y., 6 janvier 1891.

Henry (J. C.). — Electric traction for steam roads, *El. Eng.*, N. Y., 2 juin 1897.

Hering (H. S.). — Electric car tests, *El. Ry. Gaz.*, août à novembre 1895.

Hering (H. S.). — Losses from stoppages of electric cars, *Amer. El.*, juillet 1897.

Hering (H. S.). — Losses in operation of electric railways, *El. World*, 9 novembre 1895.

Hering (H. S.) and Aldrich (W. S.). — Test of the Neversink Mountain electric road, *El. World*, mai, juin et juillet 1892.

Hoho (P.). — Emploi de un ou plusieurs moteurs sur les locomotives ou voitures électriques, *Éclair. Él.*, 2 mars 1895.

Hulett (G. D.). — Efficiency test of the Third Ward Railway at Syracuse, *El. World*, 16 août 1890.

Hutchinson. — Electricity for trunk lines, *Western Electr.*, 27 novembre 1897.

Idell (F. E.). — Power test of the Daft electric railway at Asbury Park, *El. World*, 8 juin 1889.

Kohlfürst (L.). — Der elektrische Betrieb bei Eisenbahnen an Stelle des Dampflocomotiven betrieb, *Technische Blättern*, Prague, 1895.

Kramer (J.). — Berechnung der maximalen Fahrgeschwindigkeit auf elektrischen Eisenbahnen, *E. T. Z.*, 21 octobre 1892.

Lea. — Electric traction in tunnels and on mountain roads, *El. Eng.*, Lond., 4 mai 1894.

Lea. — High speed railways, *El. Eng.*, Lond., 5 et 12 janvier 1894.

Lyman (J.). — Power required in electric traction under varying conditions, *Sibley Journ.*, janvier 1895.

Maxim. — High speed traction, *Cassier's Mag.*, janvier 1896.

MONROE. — Electric railway testing, *Amer. El.*, novembre 1897.

MORGAN. — The successor of the railway, *Popular Scientific Monthly*, avril 1895.

MOSS (Lincoln). — Comparative tests of an electric motor and a steam locomotive on the Manhattan Railway, *Trans. Amer. Inst. Civ. Eng.*, 1890.

MUSSAT. — Étude sur les locomotives de grande vitesse, *Ann. des P. C.*, 2e sem. 1895.

PAUL. — Zukunft der elektrischen Bahnen, *Zeitschr. österr. Ing.*, 18 septembre 1891.

PELLISSIER (G.). — Efforts de traction, *Industr. Él.*, 10 et 25 novembre 1894.

PIKE (Wm. A.) and HUGO (T. W.). — Performance of street railway power plants, *Trans. Amer. Soc. Mech. Ing.*, juillet 1893.

POIRÉE (J.). — Expériences sur le freinage des trains de chemins de fer, *Ann. des Mines*, 5e série, t. XIII, 1858.

POTTER (W. B.). — Train acceleration and braking, *St. Ry. Journ.*, octobre 1897.

REYMOND-SCHILLER (von). — Berechnung der Batterie Stärke für Strassenbahnbetrieb mit Akkumulatoren, *E. T. Z.*, 7 mai 1893.

REYVAL (J.). — Traction électrique sur fortes rampes, *Éclair. Él.*, 15 et 29 décembre 1894.

SARCIA (J.). — Traction électrique par accumulateurs sur les lignes de St-Denis à Paris et Neuilly, *Bull. Soc. Int. des Él.*, 3 avril 1895.

SCHRÖDER (L.). — Elektrische Strassenbahnen mit stationären Akkumulatoren, *Angelegenheiten des Elektrotechnischen Vereins*, 15 décembre 1896.

SHEPARDSON (G. D.) and BURCH (E. P.). —. Electric railway motor tests, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, vol. IX, 1892.

SHORT (S. H.). — Electricity as a motive power on elevated railroads, *St. Ry. Journ.*, août 1897.

SHORT (S. H.). — Electricity on steam suburban railroads, *El. Eng.*, N. Y., 28 octobre 1897.

SHORT (S. H.). — Long railway lines, *El. Eng.*, N. Y., 6 janvier 1897.

SIEG (E.). — Akkumulatorenbahnen, *E. T. Z.*, 1er avril 1897.

SMITH. — Tests of a small railway plant, *Trans. Amer. Soc. Mech. Eng.*, vol. XV, 1894.

SOULERIN. — Les freins à air, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, septembre 1889.

SUMMERS. — Electric traction on elevated roads, *El. Engineering*, 15 septembre 1897.

SPRAGUE (F. J.). — Coming development of electric railways, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, juin 1892.

SPRAGUE (F. J.). — Solution of the municipal rapid transit problems, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 19 juin 1888.

SPRAGUE (F. J.). — Will trunk lines be operated by electricity, *Engineering Mag.*, juillet 1896.

STUART-SMITH. — Steep gradients on electric roads, *El. Journ.*, San Francisco, août 1895.

TOMLINSON. — Traction diagrams, *El. Rev.*, Lond., juillet à décembre 1896, janvier 1897.

TREGO and GOLDSCHMIDT. — Electric street railway tests, *Technograph*, n° 9, 1895.

UPPENBORN (F.). — Kalender für Elektrotechniker, München, Oldenbourg, 1898.

VLOTEN (P. van). — Rapport sur la question de la consommation d'énergie sur les tramways électriques, *P.-V. Union Int. des Tramw.*, août 1896.

VOGEL (F.). — Die Zukunft des elektrischen Betriebes von Eisenbahnen, *Zeitschr. f. Local und Strassenbahnen*, Wiesbaden, 1895.

WALLACE. — Electricity for suburban railway traffic, *El. Eng.*, N. Y., 10 mars 1897.

WETZLER (J.). — Will the electric motor supersede the steam locomotive, *Scribner's Mag.*, mai 1895.

WOOD and PALMER. — Electric railway tests, *Sibley Journ.*, janvier 1895.

5° INSTALLATIONS PARTICULIÈRES

Notices des constructeurs.

An. — Alley Elevated equipment, *St. Ry. Rev.*, août 1897.

An. — Alternating current traction plant, *Western Electr.*, 20 février 1897.

An. — Balance weight system in Providence, *St. Ry. Journ.*, avril 1895.

An. — Baltimore and Ohio electric belt line, *El. World*, 13 juillet 1895.

An. — Beecher single rail system, *El. Eng.*, N.-Y., 16 janvier et 13 mars 1895.

An. — Behr monorail system, *Engineering*, 11, 18 et 28 juin et 9 juillet 1897.

An. — Beskrivelse af den elektriske sporvej af Kristiania, *Norsk Teknisk Tidsskrift*, juillet 1892.

An. — Birmingham electric tramways, *El. Eng.*, Lond., 15 août 1890 et 10 avril 1896, *El. World*, 24 avril 1897.

An. — Boston subway, *Eng. News*, 30 mai 1895, *Western Electr.*, 28 août 1897.

An. — Bridge transportation system between New York and Brooklyn, *St. Ry. Journ.*, mars 1896 et février 1897.

An. — Bristol electric tramway, *Engineering*, 20 septembre 1895 et 30 octobre 1896, *El. Rev.*, Lond., 11 octobre 1895.

An. — Budapest electric tramways, *El. World*, 24 octobre 1891, *El. Eng.*, Lond., 16 avril 1897.

An. — Burlington and Mt. Holly railroad, *St. Ry. Journ.*, août 1895, *El. Rev.*, N. Y., 7 août 1895, *El. Eng.*, N. Y., 14 août 1895.

An. — Central London underground railway, *El. World*, 3 juillet 1897, *St. Ry. Journ.*, juillet 1897.

An. — Chemin de fer aérien électrique de Liverpool, *Lum. Él.*, 22 mai 1893.

An. — Chemin de fer électrique de l'usine de ciments Thorrand et Cie, à Voreppe (Isère), *Gén. Civ.*, 2 et 30 septembre 1893.

An. — Chemin de fer monorail électrique à l'Exposition Industrielle de Rouen, *Bull. Soc. Ing. Civ.*, 1884.

An. — Chemin de fer monorail électrique, au Concours Agricole de Paris, *Ann. Ind.*, mars 1884, *Lum. Él.*, t. XIII, 1884.

An. — Chemin de fer souterrain de Budapest, *Éclair. Él.*, 1er août 1896.

An. — Chicago electric elevated railway, *El. World*, 4 mai 1895.

An. — Cincinnati and its street railways, *St. Ry. Journ.*, juin et juillet 1894.

An. — Clontarf electric railway, *Engineering*, 6 novembre 1896.

An. — Coventry electric tramway system, *Electr.*, Lond., 22 novembre 1895, *El. Rev.*, Lond., 17 janvier 1896.

An. — Dayton-Miamisburg railroad, *El. Eng.*, N. Y., 15 juillet 1896.

An. — Douglas-Laxey railway, *El. Rev.*, Lond., 24 août 1894.

An. — Dover electric tramways, *El. Eng.*, Lond., 7 mai et 10 septembre 1897, *El. Rev.*, Lond., 1er octobre 1897.

An. — Dublin electric tramways, *El. Eng.*, Lond., 15 mai 1896, *El. Rev.*, Lond., 5 juin 1896.

An. — Electrical construction on the Mount Holly branch of the Pennsylvania Railroad, *St. Ry. Journ.*, août 1897.

An. — Electrical equipment of the suburban service of the Long Island Railroad system, *El. World*, 20 novembre 1897.

An. — Electrical mine haulage at Erie Colliery, *Colliery Eng.*, novembre 1889.

An. — Electric equipment of an elevated road, *Western El.*, 11 décembre 1897.

An. — Electric haulage and pumping plant at Forest City n° 2 Colliery, *Colliery Eng.*, décembre 1894.

AN. — Electricity for switching at Brooklyn Bridge terminals, *St. Ry. Rev.*, février 1896.

AN. — Electricity on the Illinois Central Railroad, *St. Ry. Rev.*, 15 avril 1897.

AN. — Electricity on the Manhattan Elevated Railway, *El. World*, 27 février 1897.

AN. — Electricity on the New York elevated railways, *El. World*, 6 mars 1897.

AN. — Electric traction at Bear Run mine, *Eng. and Min. Journ.*, 14 avril 1894.

AN. — Electric traction at Brock coal mines, *Eng. and Min. Journ.*, 20 janvier 1894.

AN. — Electric traction at the Essen coal mines, *Eng. and Min. Journ.*, 24 août 1895.

AN. — Electric traction on the New York, New Haven and Hartford Railroad, *El. World*, 15 mai 1897, *St. Ry. Rev.*, juin 1897.

AN. — Elektrische Bahnen in Brüssel, *E. T. Z.*, 11 novembre 1897.

AN. — Elektrische Strassenbahn Gesundbrunnen-Pankow, *E. T. Z.*, 31 octobre 1895

AN. — Elektrische Strassenbahn in Aachen, *E. T. Z.*, 2 janvier 1896.

AN. — Elektrische Strassenbahn in Gmunden, *Zeitschr. f. Elektrotechnik*, 1er novembre 1896.

AN. — Elektrische Strassenbahn in Hamburg, *E. T. Z.*, 3 octobre 1895.

AN. — Elektrische Strassenbahn in Wien, *Zeitschr. f. Elektrotechnik*, 1 février 1895.

AN. — Elektrische Strassenbahn Zürich-Hirslanden, *E. T. Z.*, 28 juin 1894.

AN. — Elektrische Untergrundbahn in Budapest, *Oesterr. Eisenbahn-Zeitung*, 14 octobre 1894.

AN. — Elektrische Vollbahn Burgdorf-Thun, *E. T. Z.*, 24 juin 1897.

AN. — Englewood-Chicago electric railway, *St. Ry. Journ.*, décembre 1896.

AN. — Heavy electric railway service in California, *St. Ry. Journ.*, février 1897.

AN. — High speed electric railway between Chicago and Saint-Louis, *St. Ry. Journ.*, mars 1892.

AN. — High speed railroads, *El. Rev.*, Lond., 19 novembre 1897.

AN. — Incline railway up Mt. Tom, *St. Ry. Rev.*, juillet 1897.

AN. — Inclined railway at Great Falls, *Eng. News*, 26 mars 1896.

AN. — Interurban electric passenger and freight railway, *St. Ry. Journ.*, janvier 1897.

AN. — Intramural railway at the World's Fair, *St. Ry. Journ.*, mai, juin et septembre 1893.

AN. — Isle of Man electric tramways, *Electr.*, Lond., 13 septembre 1895.

AN. — Lausanne electric railway, *Electr.*, Lond., 6 novembre 1896.

AN. — Leeds electric tramways, *El. Rev.*, Lond., 27 août 1897.

AN. — Liverpool Overhead Railway, *El. Rev.*, Lond., 10 février 1893.

AN. — Lowell, Lawrence and Haverhill street railway, *St. Ry. Journ.*, juillet 1895.

AN. — Madison avenue storage battery equipment, *El. World*, 30 novembre 1895.

AN. — Metropolitan West Side Elevated Railway, Chicago, *St. Ry. Journ.*, février 1895, *St. Ry. Rev.*, mai 1895.

AN. — Nantasket Beach electric railway, *El. Eng.*, N. Y., 15 mai 1895 et 1er juillet 1896, *El. World*, 6 juillet 1895, *St. Ry. Journ.*, juillet 1895 et juillet 1896.

AN. — New electric railway in the Isle of Man, *El. Rev.*, Lond., 17 juillet 1896.

AN. — Portelectric system, *El. World*, 4 mai 1889, 18 octobre 1890 et 23 mai 1891.

AN. — Recent interurban electric railways, *St. Ry. Journ.*, février 1896.

AN. — Snaefell Mountain railway, *El. Rev.*, Lond., 13 septembre 1895.

AN. — South Staffordshire electric railway, *El. Rev.*, Lond., 18 novembre 1892, *Electr.*, Lond., 18 novembre 1892 et 2 novembre 1894.

AN. — Specifications for electric railway construction, *Eng. News*, 24 janvier 1895.

AN. — Storage battery cars in Berlin, *El. Eng.*, N. Y., 22 mai 1895.

AN. — Street railway system of Boston, *St. Ry. Journ.*, avril 1895.

AN. — Street railway system of Buffalo, *St. Ry. Journ.*, mars 1895.

AN. — Street railway system of St.-Louis, *St. Ry. Journ.*, juin 1895.

AN. — Street railways of Niagara Falls, *St. Ry. Journ.*, octobre 1895, *St. Ry. Rev.*, octobre 1897.

AN. — System of the Consolidated Traction Co. of New Jersey, *St. Ry. Journ.*, août 1896.

AN. — System of the People's Traction Co. of Philadelphia, *St. Ry. Journ.*, janvier 1896.

AN. — System of the Washington, Alexandria and Mt. Vernon Railway, *St. Ry. Journ.*, janvier 1897.

AN. — The earliest electric railway, *El. World.*, 18 octobre 1890.

AN. — Three-phase railway system, *Eng. News*, 30 septembre 1897.

AN. — Traction mécanique dans Paris, *Bull. Soc. Int. des Él.*, janvier et mars 1897.

AN. — Tramway électrique de Champel au Petit-Saconnex, *Rev. de l'Électricité*, Berne janvier à mars 1895.

AN. — Tramway électrique de Marseille, *Portef. des Machines*, novembre 1893.

AN. — Tramway électrique de Neufchâtel-St.-Blaise, *Industr. Él.*, 10 et 25 novembre, 10 décembre 1897.

AN. — Tramways électriques de Châlons-sur-Marne, *Rev. Technique*, 10 janvier 1897.

AN. — Tramways électriques de Versailles, *Rev. Technique*, 10 février 1897.

AN. — Underground railway in Budapest, *Eng. News*, 21 mars 1895.

AN. — Union Elevated Railway of Chicago, *St. Ry. Journ.*, septembre 1897.

AN. — Zermatt-Gornergrat railway, *Electr.*, Lond., 20 avril 1897.

BAILY (C.). — Transport par locomotives électriques au puits n° 4 des mines de Marles, *Publ. des Ing. du Hainaut*, t. I, 3e fasc., 1892.

BALTZER (F.). — Elektrische Stadtbahn in Berlin von Siemens und Halske, Berlin, Springer, 1897.

BERTHON (J.). — Tramway électrique de Lyon-Oullins, *Électr.*, 2, 9 et 16 juin 1894.

BLONDIN (J.). — Installations électriques suisses, *Éclair. Él.*, 24 octobre, 28 novembre et 12 décembre 1896.

BOSTON TRANSIT COMMISSION. — Annual reports, Boston, Rockwell and Churchill, 1895, 1896, 1897.

BRAUN. — Elektrische Stadtbahnen, Strasseneisenbahnen und Franz-Josef Untergrundbahn in Budapest, *E. T. Z.*, 9 septembre 1897.

BRAUN. — Hoch-und Untergrundbahnen in grosseren Städten, *E. T. Z.*, 6 août 1896.

BRIDGE (A. H.). — Hartlepool electric railways, *El. World*, 11 juillet 1896.

BRONSDON (M. H.). — Counterweight system at Providence, *St. Ry. Rev.*, avril 1896 et septembre 1897.

BRUNSWICK (E. J.). — Application de la traction électrique dans les égouts de Paris, *Éclair. Él.*, 29 septembre 1894.

BÜHRING (O.). — Elektrische Strassenbahn in Baden, *E. T. Z.*, 22 août 1895.

CAMBESSÉDÈS. — Traction électrique dans les mines, *Bull. de l'Industrie Minérale*, Saint-Étienne, 1894.

CHILD (Ch. T.). — Electric traction for the Pennsylvania Railroad Company's suburban service near Philadelphia, *El. World*, 16 octobre 1897.

COISEAU (L.), COUVREUX fils et ALLARD (Félix). — Notice sur les appareils électriques employés à la construction des jetées du port extérieur de Bilbao, Paris, 1893.

CORTHELL. — Rack railways, *Eng. Mag.*, octobre 1897.

COTTRELL (S. B.). — Liverpool Overhead Railway, *Electr.*, Lond., 9 octobre 1896.

CRÉPY (L.). — Chemin de fer de Mürren, *Gén. Civ.*, t. XXIII, n° 9.

DAFT (Leo). — Early electric railway work in Pittsburg, *St. Ry. Rev.*, octobre 1896.

DENIZET (F.). — Note sur le tramway électrique de Marseille, Paris, Baudry, 1893.

Denzler (A.). — Drehstrom Tram in Lugano, *Schweiz. Bauzeitung*, 20 juin 1896.

Denzler (A.). — Elektrische Eisenbahn Sissach-Gelterkinden, *Schweiz. Bauzeitung*, 1892.

Dickinson (A.). — South Staffordshire electric tramway, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. CXVII, part. III.

Dieudonné (E.). — Traction électrique des tramways, *Électr.*, 5 mai 1894.

Dieudonné (E.). — Tramway électrique d'Enghien Saint-Gratien-Montmorency, *Éclair. l.*, 4 septembre 1897.

Doe (J. S.). — Practical application of electricity to coal mines, *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, septembre 1890.

Doolittle. — Use of electric power at Aspen, Colo., *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, septembre 1890.

Dubs. — Tramway électrique de Marseille, *Bull. de la Société scientifique et industrielle de Marseille*, 1893.

Du Riche Preller (C. S.). — Electrical steep-grade traction in Europe, *Proc. Inst. El. Eng.*, vol. XXIII, 22 novembre 1894.

Du Riche Preller (C. S.). — Electric cable railways, *Engineering*, 1er février, 1er et 15 mars 1895.

Du Riche Preller (C. S.). — Marseilles and St-Louis electric road railway. *Engineering*, 27 octobre 1893.

Du Riche Preller (C. S.). — Mürren wire-rope and electric mountain railway, *Engineering*, 14 avril et 5 mai 1893.

Du Riche Preller (C. S.). — Orbe and Chavornay railway, *Engineering*, 1er octobre 1897.

Eccles (John). — Electric haulage at Ponemah Mills, Taftville, Conn., *Proc. of the N. E. Cotton M'f'g. Assoc.*, 1895.

Eisig. — Einführung des elektrischen Betriebes auf der grossen Leipziger Strassenbahn, *E. T. Z.*, août 1897.

Feldmann (C. P.). — Elektrische Strasssenbahn mit Akkumulatorenbetrieb in Hagen, *E. T. Z.*, 17 janvier 1895.

Foster (S. L.). — Operating an electric road on a 25 per cent grade, *St. Ry. Rev.*, septembre 1895, *St. Ry. Journ.*, octobre 1895.

Gasnier (P.). — Chemin de fer électrique de Meckenbeuren-Tettnang, *Industr. Él.*, 10 septembre 1896.

Géraldy (F.). — Tramways électriques à Paris, *Bull. Soc. Int. des Él.*, 6 mars 1892, et *Lum. Él.*, 6 février 1892.

Gérard (Éric) et Henrard. — Traction par courants triphasés, *Bull. Ing. Instit. Montefiore*, 24 janvier 1896.

Gérard (Ernest). — Note sur le chemin de fer monorail pour traction électrique à grande vitesse à l'Exposition de Bruxelles-Tervueren, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, juillet 1897.

Gerry (M. H.), Jr. — Electric traction : the Metropolitan Elevated Railroad, *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 27 juillet 1897.

Girault (P.). — Tramways électriques d'Angers, *Éclair. Él.*, 28 novembre 1896.

Greathead (J. H.) and Fox (F.). — Liverpool Overhead Railway, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 27 février 1894.

Heft (N. H.). — Application of electricity to railroads now operated by steam power, *Proc. Amer. St. Ry. Assoc.*, octobre 1897.

Heft (N. H.). — Electric railroading on the New York, New Haven and Hartford system, *St. Ry. Journ.*, juin 1897.

Hering (H. S.). — Electric system of the Philadelphia Traction Co., *El. World*, 20 et 27 octobre, 3 et 10 novembre 1894.

Herzog. — Electric underground railway in Budapest, *El. World*, 24 décembre 1896.

HESS (A.). — Tramway électrique de Bordeaux-Bouscat au Vigan, *Lum. Él.*, 3 février 1894.

HILLAIRET. — Traction électrique sur l'embranchement minier de Montmartre à la Béraudière, *Bull. Soc. Int. des Él.*, mars 1895, et *Rev. Gén. des Ch. de Fer*, octobre 1894.

HOPKINSON (Edward). — Electrical railways : the City and South London railway, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. CXII, part. 2, 1893.

HOPKINSON (Edward). — Electrical tramways : the Bessbrook and Newry tramway, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 6 décembre 1887.

HUFF (S. W.). — Columbia and Maryland railway, *St. Ry Rev.*, mars et avril 1897.

JACQUIN (Ch.). — Tramway électrique de Romainville, *Éclair. Él.*, 6, 20 et 27 juin 1896.

JOHNSTON (A. Langstaff). — Richmond and South Side electric railway, *El. Eng.*, N. Y., 17 juin 1891.

KALLMANN. — Elektrischer Betrieb der Berliner Strassenbahnen, *Bericht des Elektrotechnischen Vereins*, 1896.

KÖSTLER (Hugo). — Das Project einer elektrischen Bahn für den Schnellverkehr zwischen Wien und Pest, *Zeitschr. österr. Ing.*, 9 décembre 1892.

LAFFARGUE (J.). — Tramways électriques de Hanovre, *Industr. Él.* 10 mai 1897.

LASNIER (J. F.). — Système de traction électrique employé sur les lignes de la Madeleine à Courbevoie-Neuilly et Levallois, *Bull. Soc. Int. des Él.*, 5 mai 1897.

LEFÈVRE (J.). — Chemin de fer de la Jungfrau, *Industr. Él.*, 25 mars 1897.

LEVIN (A. E.). — Jungfrau railway, *El. World*, 22 mai 1897.

LÉVY-LAMBERT (A.). — Tramway électrique de Clermont-Ferrand, *Portef. des Machines*, novembre 1890.

L'HOEST (G.). — Tramway électrique de Hagen, *Bull. Ing. Instit. Montefiore*, 1895.

LIBERT. — Traction électrique dans les mines, *Rev. Univ. des Mines*, t. XXVII, 1894.

MCLEAD. — Electric and steam trains on the same track, *Eng. News*, 29 août 1895.

MAKUC (E.). — Die elektrische Grubeneisenbahn in Bleiberg (Kärnten), *Oesterr. Zeitschr. für Berg und Hüttenwesen*, août 1892.

MANAIRA (T.) — Tramvia elettrica da Firenze a Fiesole, Roma, 1891.

MARCILLAC (P.). — Tramways électriques de Marseille, *Lum. Él.*, 13 et 20 mai 1893.

MASSON. — Traction électrique dans les mines, *Rev. Univ. des Mines*, t. XVI, 1891.

MENGES. — Tramway de La Haye-Scheveningen, *Industr. Él.*, 10 mars 1894.

MONTPELLIER (J.-A.). — Tramway électrique de Kiew, *Électr.*, 28 juillet et 4 août 1894.

MOUTIER (A.). — Tramways de Budapest, *Éclair. Él.* 13 février et 20 mars 1897.

PALAZ (A.). — Tramways électriques de Lausanne, *Industr. Él.*, 25 mars 1895.

PARKER (Thomas). — Electrical equipment of the Liverpool Overhead Railway, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 27 février 1894.

PELLISSIER (G.). — Traction électrique par accumulateurs à Paris, *Éclair. Él.*, 11 janvier 1896.

PIÉRARD (E.). — Monorail Lartigue-Behr à Tervueren, *Électr.*, 15 mai 1897.

POCOCK (F. A.). — Electricity in mines, *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, février 1890.

RAYMOND (H. E.). — Baltic-Taftville transmission plant, *El. World*, 4 juin 1896.

RESPIGHI (L.). — Impianto di trazione elettrica Siemens e Halske a Genova, *Elettricista*, septembre, octobre et novembre 1893.

ROBERTSON (R.). — Electrical haulage at Earnock Colliery, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 5 mars 1895.

ROSS (F.). — Elektrische Strassenbahn in Hannover, *E. T. Z.*, 1er avril 1897.

ROUTIN (L.). — Tramway de Lugano, *Éclair. Él.*, 13 juin 1896.

SALADIN. — Applications de l'électricité dans les mines, *Bull. Soc. Int. des Él.*, décembre 1891.

Scheibner (C. P.). — Florence and Fiesole electric railway, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. CVI, part. 2, 1891.

Short (S. H.). — Electricity as a motive power for the suburban railway service of New England, *St. Ry. Journ.*, octobre 1897.

Smith (W. Nelson). — Electrical haulage system of the New Orleans and Western R. R. Co. at Port Chalmette, *El. World*, 3 avril 1897.

Soulier (A.). — Tramways électriques à accumulateurs de Paris-Madeleine à Courbevoie, *Industr. Él.*, 25 avril 1897.

Spaulding (H. C.). — Electric power transmission in mining operations, *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, septembre 1890.

Sprague (T. W.). — A central station in mining work, *Eng. and Min. Journ.*, 14 septembre 1895.

Sprague (T. W.). — Electric haulage at the Berwind-White Co's Eureka n° 22 Colliery, *Eng. and Min. Journ.*, 1 juin 1895.

Strub. — Jungfraubahn, *Schweiz. Bauzeitung*, 17 juillet 1897, et *E. T. Z.*, 19 août 1897.

Talbot (J. E.). — Boston subway, *El. World*, 11 septembre 1897.

Tainturier (C.). — Tramway de la Place de la République à Romainville, *Bull. Soc. Int. des Él.*, 3 juin 1896.

Tainturier (C.). — Tramway électrique à conducteur inférieur à l'Exposition de Lyon, *Gén. Civ.*, 13 octobre 1894.

Thurnauer (K.). — Elektrische Hochbahn in der Weltausstellung zu Chicago, *E. T. Z.*, 8 décembre 1893.

Thurnauer (K.). — Stufenbahn mit gleichmässig vervielfachter Geschwindigkeit in der Weltausstellung zu Chicago, *E. T. Z.*, 4 janvier 1894.

Troske. — City and South London Railway, *Zeitschr. des Ver. deutscher Ing.*, 16 et 23 janvier 1892.

Uppenborn (F.). — Elektrische Strassenbahn in Budapest, *E. T. Z.*, 3 août 1891.

Weller. — Boston subway, *El. Eng.*, N. Y., 2 septembre 1897.

Wilczek (E.). — Chemin de fer électrique souterrain de Budapest, *Bull. Commiss. Int. des Ch. de Fer*, avril 1896.

Wüst-Kunz und Thormann. — Jungfraubahn, *Elektrotechnischer Anzeiger*, 21 et 28 janvier 1897.

Zipernowsky (C.). — Elektrische Bahnen für interurbanen Schnellverkehr, *E. T. Z.*, 2 et 9 octobre 1891.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

A

C

D

E

F

M

N

R

T

U

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY


89090512112
b89090512112a

